

文章编号:1001-9081(2009)04-1095-04

# 实现无线传感器网络与 IPv6 网络互联的一种方案

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

(1. 常熟理工学院 计算机科学与工程学院, 江苏 常熟 215500; 2. 南京理工大学 计算机工程与技术学院, 南京 210094)

(wxn\_2001@163.com)

**摘要:**提出并设计了无线传感器网络与 IPv6 网络无缝互联的通信模型。此模型提出了一种传感器地址自动配置方案,并在此方案之上实现了传感器节点的自动寻址路由。此外,给出了一种适用于无线传感器网络(WSN)的 IPv6 协议裁剪方案,以节省传感器节点的功耗。在实验平台及仿真环境中,实现了模型并且分析了模型的性能,实验结果证明了此模型的有效性和正确性。

**关键词:**传感器网络; IPv6 网络; 路由; 协议

**中图分类号:** TP393.03 **文献标志码:** A

## Scheme on implementing interconnection between wireless sensor networks and IPv6 networks

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

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

2. School of Computer Engineering and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** The author proposed and designed 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. In addition, this model puts forward a reduced IPv6 protocol stack to save a sensor node's power. This model was implemented on an experimental platform and in a simulation environment respectively, and its performance was analyzed. The experimental results prove the validity and correctness of this model.

**Key words:** sensor network; IPv6 network; routing; protocol

## 0 引言

无线传感器网络在许多重要领域都有着潜在的实用价值,已经引起了学术界和工业界的高度重视。就无线传感器网络而言,它必须和一个外部网络连接在一起才具有更真实的实用价值。因此,无论从地理范围还是从网络规模来讲,Internet 互联网都是外部网络的一个最好选择。IPv6 的很多良好特性使得某些无线传感器网络的应用成为可能,因此实现无线传感器网络和 Internet 网络的通信具有重大意义。但是,由于有关如何实现无线传感器网络与 IPv6 网络互联的研究才刚刚起步,因此还有很多问题需要进一步研究和讨论。

## 1 关键技术

无线传感器网络作为当今信息领域新的研究热点,有很多关键技术有待进一步研究,这些关键技术主要是:

1) 地址自动配置。现有的 IPv6 地址自动配置方式在无线传感器网络中还存在一些问题,例如传感器节点可能没有类似于 MAC 地址的唯一标识,因此无法完成地址的无状态自动配置。

2) 传感器节点的定位信息。在某些情况下,节点所采集到的数据,若没有位置信息几乎没有应用价值。所以,如何以最小的代价使外部网络获取传感器节点的定位信息是一个亟

待解决的问题。

3) 路由问题。必须要在无线网络与 IPv6 网络的互联中寻求一种有效的、节能的路由算法以延长传感器的寿命。

4) IPv6 协议栈优化。要在存储器和处理器极其有限的传感器节点上实现 IPv6 协议还有很多问题需要解决,必须对 IPv6 协议栈进行剪裁(如报文压缩、适当剪裁协议功能等)以适合传感器网络的使用。

## 2 相关工作

目前,针对无线传感器网络已经提出了很多种路由协议<sup>[1-3]</sup>。对于网络协议的剪裁,研究人员提出了很多方法,如协议映射、同态、概率搜索以及其他方法<sup>[4-5]</sup>。文献[6]提出了一种利用移动 IPv6 技术实现传感器网络与 IPv6 网络互连的方案。文献[7]提出了一种分布式的、基于地理位置信息的传感器节点地址自动分配方案,但此方案是建立在 IPv4 基础之上的,并不能满足未来传感器网络与 IPv6 Internet 网络互联的需求。综上所述,如何实现无线传感器网络与 IPv6 网络的互联通信这一个课题还有待进一步探讨和研究。

## 3 通信模型

本模型定义 IPv6 网络与无线传感器网络的接入网关称作 IPv6 接入网关,并且 IPv6 接入网关是固定节点,不受电量

收稿日期:2008-10-09;修回日期:2008-12-03。 基金项目:国防科工委应用基础资金资助项目(J1300D004);部委预研课题项目(513160801);南京理工大学创新基金资助项目(2007060005)。

作者简介:王晓喃(1973-),女,辽宁沈阳人,讲师,博士,主要研究方向:计算机网络协议与应用; 钱焕延(1950-),男,江苏泰州人,教授,博士生导师,主要研究方向:计算机网络理论与应用; 唐振民(1961-),男,江苏南京人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:模式识别、计算机网络理论。

与存储空间等硬件条件的限制。

### 3.1 传感器节点地址格式

根据 IPv6 地址的分层结构以及传感器节点自身特点,本模型对传感器节点采用图 1 所示的地址格式。

|    |                           |   |    |    |    |                     |                   |
|----|---------------------------|---|----|----|----|---------------------|-------------------|
| 3  | 13                        | 8 | 24 | 16 | 48 | 8                   | 8                 |
| FP | Sensor Network ID(Prefix) |   |    |    |    | Horizontal Ordinate | Vertical Ordinate |

图 1 传感器节点地址格式

在本模型中,一个传感器节点的 IPv6 地址分为 4 个部分,第一部分是可聚合全局地址格式前缀,取值范围与 Unicast 相同,即 001;而随后的 109 b 是第二部分,即传感器网络 ID(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 ID(地址前缀)都相同;第三部分是传感器节点的横坐标;第四部分是传感器节点的纵坐标。在本模型中,由于传感器节点利用坐标来定位自身位置,因此,根据本模型的地址格式定义,传感器节点位于一个  $256 \times 256$  单位距离的坐标系工作区域内,单位距离可以根据工作区域的尺寸自行定义。如果在某些场合此地址格式无法满足传感器节点的数量或者工作区域的坐标精度要求,那么还可以根据需要来更改传感器节点坐标的比特位数,例如:将第二部分设置为 93 b,横坐标设置为 16 b,纵坐标也设置为 16 b。

在本模型中,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(传感器节点或者 IPv6 节点)节点进行通信。传感器节点的 IPv6 地址分为两个部分,即 112 b 传感器网络 ID(前缀)与 16 b 传感器节点 ID,其中,112 b 传感器网络前缀来源于 IPv6 接入网关的 IPv6 地址前缀,而传感器节点 ID 的前边 8 b 来源于传感器节点自身定位信息的横坐标,后边 8 b 来源于纵坐标。如图 1 所示。

### 3.2 传感器节点定位原理

本模型采用的传感器定位算法分为测距、定位和求精三个阶段。在测距阶段,定位算法采用了 DV-hop 算法的思想,首先使用典型的距离矢量交换协议,使传感器网络中所有节点获得距离锚节点的跳数。在定位阶段,锚节点获得其他锚节点位置和相隔跳距后,它会计算出网络平均每跳距离,然后将其作为一个校正值广播至网络中。当接收到校正值后,传感器节点根据到达锚节点的跳数计算出与锚节点的距离。这里,采用了最小二乘法(Lateration)进行计算,当未知节点获得与 3 个或 3 个以上锚节点( $x_i, y_i$ )的距离  $d_i$  时,可以推算出以下计算公式:

$$\begin{aligned} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 &= d_1^2 \\ &\vdots \end{aligned} \quad (1)$$

$$(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 = d_n^2$$

由式(1)可推出:

$$\begin{aligned} x_1^2 - x_n^2 - 2(x_1 - x_n)x + y_1^2 - y_n^2 - 2(y_1 - y_n)y &= d_1^2 - d_n^2 \\ &\vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 - 2(x_{n-1} - x_n)x + y_{n-1}^2 - y_n^2 - 2(y_{n-1} - y_n)y &= d_{n-1}^2 - d_n^2 \end{aligned} \quad (2)$$

令:

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix}, \quad \hat{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$b = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_1^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_{n-1}^2 \end{bmatrix}$$

利用式(2),(3)可求得: $\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T b$ 。

最后利用式(4):

$$residue = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - d_i}{n} \quad (4)$$

来判断所求的结果是否有效,当  $residue$  超过无线射程时,结果无效。

在求精阶段,节点测量得到所有一跳邻居的距离并依次更新自己的位置。该算法的所有位置计算都使用最小二乘法。算法引入了置信度来提高求精阶段的性能,置信度被用来在三边定位中加权。当未知节点更新其位置估计时同样也更新其置信度。这样,网络的平均置信度将随迭代而增加,提高了覆盖度和精度。

该算法的定位精度比较高,在网络连通度较高的情况下能较好地容忍距离误差。

### 3.3 传感器节点获取 IPv6 地址

根据 3.2 小节的描述,本模型中的传感器网络与三个 IPv6 接入网关  $G$ 、 $G'$  和  $G''$  相连,其中  $G$  的坐标为  $(0,0)$ ,  $G$  和  $G'$  构成了整个传感器网络的横坐标,  $G'$  与  $G''$  通过 GPS 定位系统来获取它相对于  $G$  的相对位置,即坐标值。本模型中,已经加入传感器网络的节点需要保存它所在位置的坐标信息(2 个字节)。

本模型中传感器节点通过 3.2 节所描述的算法获取自己的定位坐标  $x, y$ , 并且构成 16 b 的内部地址,当传感器节点与外界 IPv6 节点进行通信时,由所经过的 IPv6 接入网关将 IPv6 地址的前缀与传感器的内部地址组合构成完整的 IPv6 地址,然后发送到 IPv6 网络中。

由于本模型中具有相同坐标的传感器节点可能产生多个,这样导致可能有多个传感器节点拥有相同的 IPv6 地址,因此本模型采用的地址分配策略有如下好处:

1) 由于拥有相同 IPv6 地址的传感器节点的距离都很相近(在同一个坐标区域内),因此对本坐标区域所采集到的信息可以起到一个备份镜像的作用。例如,当某个节点电量不足失效时,另外一个节点可以提供相关有效的信息。

2) 由于本模型采用节点坐标信息进行路由,因此,多个具有相同坐标的节点可以形成多个路由路径,从而具有负载均衡的作用。

但是,由于 IPv6 通信是通过 IP 层地址与传输层端口号来实现的,因此多个传感器节点具有相同的 IPv6 地址可能会带来通信问题,例如,具有相同 IPv6 地址的传感器可能采用相同的端口号与外界节点进行通信,这会带来通信混乱。具体的解决办法参见 3.6 节。

图 2 中,一个新的传感器节点加入传感器网络时,通过定位算法计算出自己的定位横坐标为 7,纵坐标为 8,因此得到 IPv6 地址 3FE8:1:1:1:1:1:7:8/112。

### 3.4 传感器节点注销

传感器节点一般适用于人们无法接近的恶劣或特殊环境,因此它们的电量是不可补充的。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。在本模型中,由于传感器节点的地址信息来源于定位信息,因此节点失效时不需要做任何注销操作。

### 3.5 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 协议进行剪裁:

#### 3.5.1 IPv6 报头剪裁

IPv6 报文头部的 Version、Traffic Class 和 Flow Label 域—

般情况下都是常数,而 Payload Length 的值可以通过下层帧中的长度域计算出来,因此可以对 Version、Traffic Class、Flow Label、Payload Length 以及 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,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。

IPv6 头部控制域中每个位的具体含义如下:

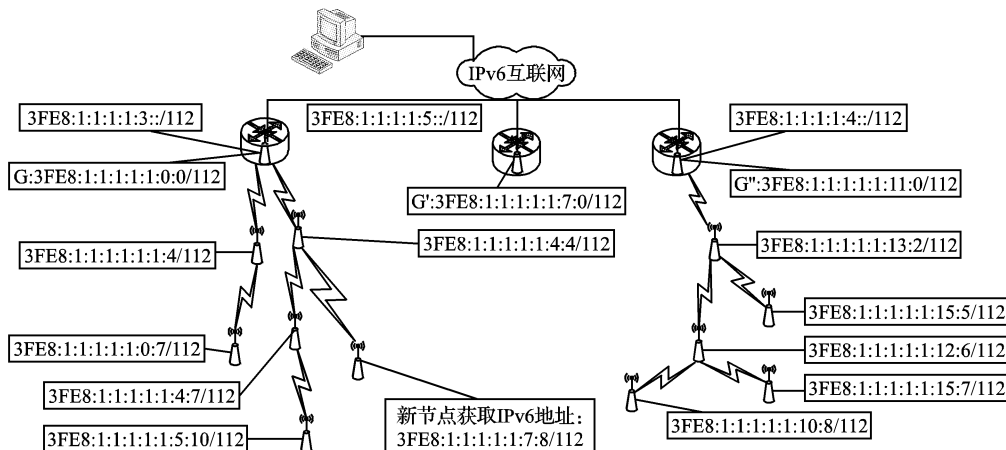


图2 传感器节点获取 IPv6 地址

|        |              |
|--------|--------------|
| 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

|                                    |             |     |      |     |
|------------------------------------|-------------|-----|------|-----|
| 位数: 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

### 3.5.2 地址压缩

本模型在具有相同传感器 ID 的网络内部采用内部地址 (即 IPv6 地址的后 16 位传感器节点 ID) 实现传感器节点的路由寻址。如果一个传感器节点与 IPv6 节点进行通信时, IPv6 节点地址在传感器网络内部只被传输与所通过的 IPv6 接入网关 G 的 IPv6 地址不同的部分,例如:如果 G 的 IPv6 地址为 3FE8:1:1:2:1:1:0:0/112,而 IPv6 节点的地址为 3FE8:1:1:1:2:1:1:1,那么在传感器网络中,IPv6 节点的地址被压缩为 1:2:1:1:1,由于前边的地址前缀与 G 相同,故不在传感器网络中传输。

### 3.6 路由分析

由于传感器节点主要用于采集数据并且将这些数据发送到外部 IPv6 网络进行观测和处理,因此,一般情况下都是外部 IPv6 节点主动发起与传感器的连接会话以获取其采集的数据。由于 IPv6 节点可以通过 IPv6 地址与传输层的端口号唯一地标识一次连接会话,因此,在 IPv6 节点与传感器节点 X 建立连接会话之后,X 要记录下此次会话的 IPv6 地址以及端口号,如果会话中的后续消息传输到另外一个具有相同 IPv6 地址的传感器节点 X' 时,它会检测到此消息并不是自己会话中的消息,那么 X' 就将此消息在本坐标区域进行广播,这样,X 会接收到此消息继续进行会话通信。

本模型采用传感器定位信息来获取 IPv6 地址,因此传感器的 IPv6 地址很好地反映了传感器节点的路由信息。在本模型中,如果 IPv6 节点 N 请求与传感器节点 I (定位坐标为  $x_i, y_i$ ) 进行通信,那么 N 发送的消息到达节点 J 的路由过程为:

1) N 发送一条消息,源地址为 N 的 IPv6 地址,目的地址为 I 的 IPv6 地址,那么在 IPv6 网络中,此消息会按照 IPv6 路由协

议被路由到包含传感器节点 I 的传感器网络的一个 IPv6 接入网关 G;

2) G 接收到此消息之后,首先对消息进行压缩操作,然后发送一条广播消息 NextHop,在消息的覆盖范围内的传感器节点会接收到 NextHop 消息,它们会将自己的定位坐标 ( $x_1, y_1$ ) 返回给 G;

3) G 通过公式  $\sqrt{(x_1 - x_i)^2 + (y_1 - y_i)^2}$  计算出返回坐标的传感器节点与目标节点 I 的距离,然后选择与 I 距离最短的传感器节点  $A_1$  作为下一跳节点;

4)  $A_1$  接收到此消息后,首先查看本身的内部地址是否与消息的目的地址相同,如果相同,转到 6) 操作,否则同样发送一条广播消息 NextHop,在消息覆盖范围内的传感器节点会接收到 NextHop 消息,它们会将自己的定位坐标 ( $x_{j+1}, y_{j+1}$ ) 返回给  $A_j$ ;

5)  $A_j$  通过公式  $\sqrt{(x_{j+1} - x_i)^2 + (y_{j+1} - y_i)^2}$  计算出返回坐标的传感器节点与目标节点 I 的距离,然后选择与 I 距离最短的传感器节点  $A_{j+1}$  作为下一跳节点,重复 4) 操作;

6) I 节点接收到消息后进行处理,将响应消息按照原路径返回到 G;

7) G 接收到此消息后,首先对响应消息进行解压缩操作,然后将此消息按照 IPv6 路由方式路由到 N,至此,IPv6 节点 N 与传感器节点 I 的一次交互过程结束,如图 5 所示。

4 性能分析

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如图 2 所示。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 地址是按照定位信息自动配置的。在实验平台上,首先测试了 IPv6 节点与传感器节点是否能进行通信,通过在 IPv6 节点上向传感器节点 (IPv6 地址为 3fe8:1:1:1:1:1:1:4) 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。

从图 6 可以看出,本模型可以很好地完成 IPv6 节点与传感器节点之间的路由。

此外,为了测试本模型路由算法的性能,做了如下仿真实验:在上述实验环境中,设置每个节点每秒钟发送 10 个数据包,每个数据包的大小为 50 B。对本模型以及文献[7]提出的模型(以下称“现有模型”)进行了数据包接收率与延迟时间的性能分析,其中,数据包接收率指接收方接收到的数据包总体数目与发送方发送的数据包总体数目的比值,延迟时间

是指发送方发送数据包时刻到接收方接收到数据包时刻之间的时间间隔,分析结果如图 7 所示。

图 7 的性能分析结果如下:1)现有模型的 IPv6 协议栈没有压缩,因此会有大量数据在网络中传输导致网络拥塞,因此增加延迟时间并且引起数据接收率下降;2)本模型中采用 IPv6 地址进行路由寻址,不需要发送大量的控制信息来探测下一跳的位置,因此不会引起网络拥塞从而提高了数据包延迟时间,同时也提高了数据包接收率。

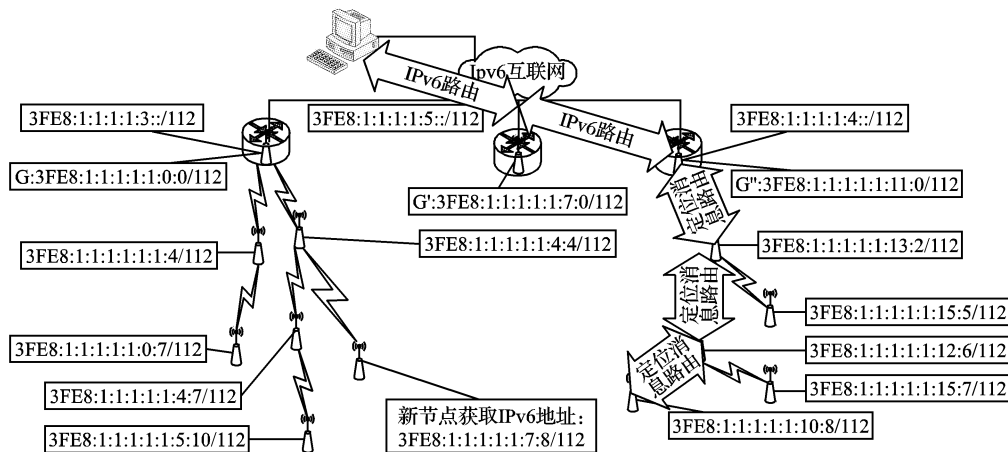


图 5 路由过程

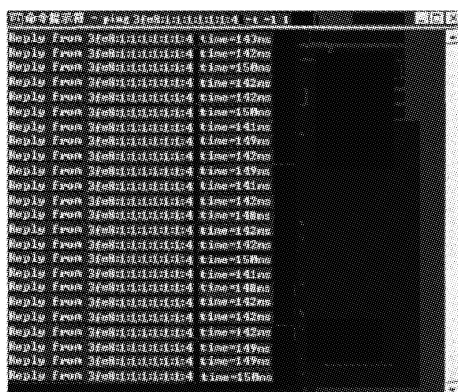
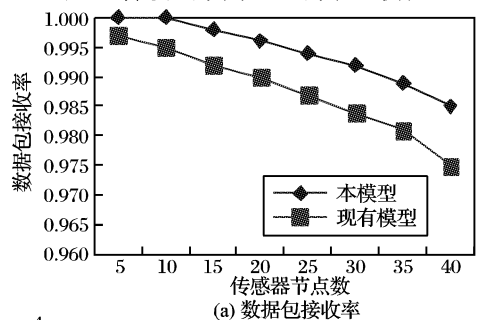
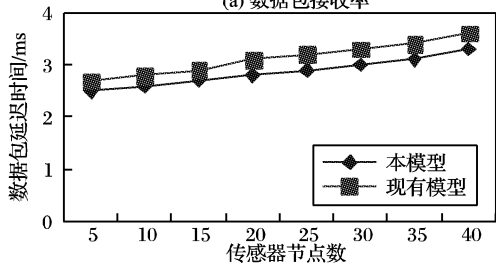


图 6 传感器节点与 IPv6 节点互通实验



(a) 数据包接收率



(b) 数据包延迟时间

图 7 性能分析

本模型中,由于传感器节点通过定位信息来获取 IPv6 地址,因此 IPv6 节点可以通过传感器地址来获取传感器节点所在物理位置的信息,这对环境监测、危险区域远程控制等领域

来说是非常重要的。

## 5 结语

本文提出了 IPv6 网络与无线传感器网络无缝连接的通信模型,并且在小型实验平台与仿真环境下,测试了此模型的可行性与有效性。目前,无线传感器网络与 IPv6 网络互联是一个很活跃的研究方向,但是由于有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] AL-KARAKI J N, KAMAL A E. Routing techniques in wireless sensor networks: A survey[J]. IEEE Wireless Communications, 2004, 11(6): 6 - 28.
- [3] CHANG J H, TASSIULAS L. Maximum life time routing in wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(4): 609 - 619.
- [4] KUSHALNAGAR N, MONTENEGRO G, SCHUMACHER C. 6LoWPAN: Overview, assumptions, problem statement and goals [EB/OL]. [2008 - 09 - 10]. <http://draft-kushalnagar-lowpan-goals-assumptions-06.txt>.
- [5] OLVEZKY P C, THORVALDSEN S. Formal modeling and analysis of wireless sensor network algorithms in real-time maude[C]// Proceedings of the 20th International Parallel and Distributed Processing Symposium 2006: IPDPS 2006. Washington, D C: IEEE Computer Society, 2006: 25 - 29.
- [6] KIM H H, HONG C S, OKAMURA K. A routing scheme for supporting network mobility of sensor network based on 6LoWPAN [C]// Proceedings of 10th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium: APNOMS 2007, LNCS 4773. Berlin: Springer-Verlag, 2007: 155 - 164.
- [7] DUNKELS A, ALONSO J, VOIGT T. Making TCP / IP viable for wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 1st European Workshop on Wireless Sensor Networks: EWWSN'04. Berlin: [ s. n. ], 2004: 364 - 379.