

# 基于 6LoWPAN 的边缘路由器设计研究

肖湘宁<sup>1</sup> 王鹏<sup>1,2</sup> 李建立<sup>3</sup> 郭萍<sup>1</sup>

(华北电力大学电气与电子工程学院 北京 102206)<sup>1</sup> (中国电力科学研究院 北京 100192)<sup>2</sup>  
(北京智芯微电子科技有限公司 北京 102200)<sup>3</sup>

**摘要** 提出了一种智能 6LoWPAN 传感网络边缘路由器设计实现方法。该方法基于嵌入式操作系统 Linux 系统平台和单 CPU 的方案实现,通过在系统 Linux 上移植 6LoWPAN 协议簇,使射频接口 LAN 承载 6LoWPAN 网络,本地 6LoWPAN 传感网络通过边缘路由器接入互联网。6LoWPAN 传感网络边缘路由器采用多协议融合的方式实现 IPv4/IPv6 双栈协议、NAT64 协议、6to4 隧道协议的统一,实现 6LoWPAN 网络节点通过 6LoWPAN 边缘路由器与互联网在不同网络环境下的自适应接入。

**关键词** 6LoWPAN, 传感网络, 边缘路由器, 多协议融合

**中图分类号** TP393 **文献标识码** B **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.12.046

## Research of Edge Router Based on 6LoWPAN

XIAO Xiang-ning<sup>1</sup> WANG Peng<sup>1,2</sup> LI Jian-li<sup>3</sup> GUO Ping<sup>1</sup>

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)<sup>1</sup>

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)<sup>2</sup>

(Beijing Smartchip Microelectronics Technology Company Limited, Beijing 102200, China)<sup>3</sup>

**Abstract** In this paper, a method to design edge router based on smart 6LoWPAN sensor network was proposed. With the use of Linux embedded operating system and single CPU, this method transplants 6LoWPAN protocol suite on Linux system, makes 6LoWPAN network load on LAN radio frequency interface and connect to Internet through edge router. By using multiple protocol fusion, IPv4/IPv6 double stack protocol, NAT64 protocol and 6to4 tunnel protocol will be unified, and 6LoWPAN network nodes will be accessed adaptively to the Internet in different network environment.

**Keywords** 6LoWPAN, Sensor network, Edge router, Multiple protocol fusion

随着传感物联网的兴起,在工业或日常生活中需要把传感网络设备接入到互联网中,以满足身在异地的人们通过网络终端访问和控制设备的需求。让传感网络设备接入互联网可以通过边缘路由器来实现。

目前传感网络领域主要是 ZigBee 网络。ZigBee 传感网络内的节点需要访问互联网,首先应把要访问的信息告诉 ZigBee 网关,ZigBee 网关根据这些信息与互联网进行链接,最后 ZigBee 网关再把访问信息返回给传感网络内部的设备节点<sup>[1]</sup>。

ZigBee 目前采用自己定制的协议标准,没有采用互联网标准网络协议,因此 ZigBee 无法真正做到本地端点与互联网的端到端访问<sup>[5]</sup>,也就是说,由于 ZigBee 在没有采用 IP 协议的情况下,只能通过应用层进行翻译后,实现表面上的端点到互联网的访问功能。随着端点应用的增多,这势必增加 ZigBee 网关的复杂性和臃肿性,降低传感网络路由的独立性<sup>[3,4]</sup>。

## 1 6LoWPAN 相比 ZigBee 的优势

6LoWPAN 协议簇包括 IPv6 网络协议、802.15.4 链路协议及 6LoWPAN 适配层协议。与 ZigBee 协议网络一样<sup>[6-8]</sup>,6LoWPAN 也是一个 mesh 网络,可以自组网。但是由于 6LoWPAN 采用标准网络 IPv6 协议,所以相比 ZigBee 而言,它具有更强大的互联网特性<sup>[9]</sup>。

因此,本文设计一种基于 6LoWPAN 的边缘路由器,它是 6LoWPAN 网络终端接入互联网的关键设备。像家用路由器一样,它具有路由和转发功能。不同的是,由于采用 IPv6 协议,本地网络内终端的地址是唯一的<sup>[8-10]</sup>,因此可以真正实现设备和服务器端到端的访问,不需要在应用层进行繁琐的协议转换;为了满足多种网络环境下的使用,边缘路由器必须具有 IPv4/IPv6 双栈、IPv6 过渡隧道功能及 IPv6-IPv4 协议转换功能。除此之外,边缘路由器采用 TCP/UDP 协议,以满足不同的应用需求。如应用层移植 SNMP 协议,远程主

到稿日期:2014-12-23 返修日期:2015-02-17

肖湘宁(1953—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统谐波、电能质量、现代电力电子技术及其应用;王鹏(1982—),男,博士生,主要研究方向为配电网运行分析、配电自动化、分布式电源接入运行、智能配电传感等,E-mail:w1213@epri.sgcc.com.cn;李建立(1983—),男,硕士生,主要研究方向为 6LoWPAN 无线自组网/ZigBee 无线组网、嵌入式软件开发等,E-mail:lijianli@sgitg.sgcc.com.cn;郭萍(1990—),女,硕士生,主要研究方向为随机分布控制及其在风电控制中的应用、智能配电传感等,E-mail:apple\_gp@126.com。

站可以对边缘路由器进行网络配置、管理、流量控制及在线软件升级服务等<sup>[11-14]</sup>。

## 2 6LoWPAN 边缘路由器方案的设计

该方案基于嵌入式操作系统 Linux 系统平台和 ARM CPU 硬件平台实现,通过在系统 Linux 上移植 6LoWPAN 协议簇,使射频接口 LAN 承载 6LoWPAN 网络。

硬件功能模块结构如图 1 所示。其 LAN 口设计实现选用支持 IEEE802.15.4 标准的 SI4432 射频芯片,在软件上实现 802.15.4 链路协议和 6LoWPAN 协议,这样 LAN 口就实现了对 6LoWPAN 网络的支持。

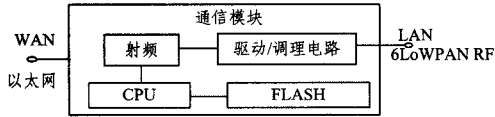


图 1 边缘路由器硬件功能

边缘路由器的自组网功能通过 6LoWPAN 技术实现,结合 IPv4/IPv6 双栈协议和 IPv6 相关过渡技术实现对不同环境下的互联网接入。同 ZigBee 技术一样,6LoWPAN 技术也采用 IEEE802.15.4 规定的物理层和 MAC 层,不同之处在于 6LoWPAN 技术在网络层上使用 IETF 规定的 IPv6,即在 IPv6 的网络层和 MAC 层之间加入一个适配层,以提供对 IPv6 必要的支持。系统软件层次见图 2<sup>[15]</sup>,主要功能见表 1,网络连接模型见图 3。

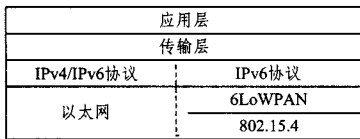


图 2 边缘路由器软件层次模型

表 1 关键功能定义

功能	定义
802.15.4 协议	链路层采用 802.15.4 协议栈
6LoWPAN	IPv6 与 802.15.4 适配层协议
IPv6 过渡功能	在 IPv4 网络下实现 IPv6 网络的介入技术,6to4/NAT64 协议
RPL 路由协议	本地路由寻址、转发
UDP	传输协议
SNMP	网络管理、配置功能

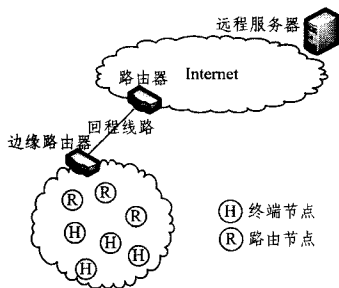


图 3 边缘路由器-网络连接模型

## 3 智能 6LoWPAN 边缘路由的实现步骤

1)边缘路由器本地 LAN 口承载的是 6LoWPAN 射频网络,负责管理本地网络(组网、分配 IP,本地路由),物理和链路协议采用标准的 IEEE802.15.4 协议,网络层采用标准的 IPv6 协议。它发起的组网流程如图 4 所示<sup>[13]</sup>。

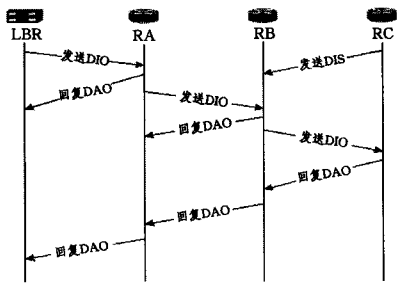


图 4 6LoWPAN 组网流程示意图

2)边缘路由器 WAN 口接入 IPv4 公网时,边缘路由器会根据上层报文信息做出判断,如果是 IPv4 报文,边缘路由器会使用 IPv4 协议;如果边缘路由器 WAN 口接入的是 IPv6 公网,边缘路由器会使用 IPv6 协议;IPv4 与 IPv6 协议在 WAN 口上兼容;在区分 IPv4 和 IPv6 协议时,采用增强型的 socks 库,满足 IPv4 与 IPv6 接口的动态选择。

3)本地终端节点通过边缘路由访问远程的 IPv6 服务器时,边缘路由器的 6to4 功能模块将 IPv6 报文封装在 IPv4 报文内部,穿越 IPv4 公网,到达 IPv6 主机,IPv6 主机获得报文后解析 IPv6 报文。这样,边缘路由器能在 IPv6 无线传感网络和公网之间启动协议转换、路由、转发的功能。

当本地终端节点访问远程 IPv4 服务器时,边缘路由器启动 IPv4 与 IPv6 协议转换模块 NAT64,实现 IPv4 与 IPv6 的双向转换,这样 IPv4 远程主机与本地终端在 NAT64 模块的协助下可以互相通信;6to4 模块与 NAT64 模块兼容设计,封装在 IP 网络层。本地节点访问远程服务器的流程设计如图 5 示,远程服务器访问本地端点的流程与之相反。

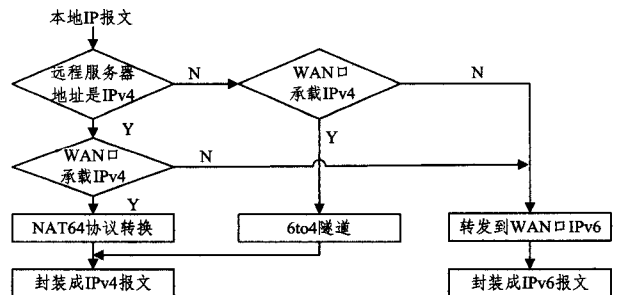


图 5 传感网络端点访问远程服务器的解决方案

4)远程主机可以对 6LoWPAN 边缘路由进行软件升级服务和网络配置、管理功能,因此具有良好的独立性。

## 4 性能测试

实验环境配置如下。

(1)NAT64 功能测试:

a)6LoWPAN 边缘路由启动并自动获取 IPv4 地址 IPv6addresses:

2001::0212:4b00:026a:99d1

fe80::0212:4b00:026a:99d1

MAC addr:

12:4B:6A:99:D1:1200

6LoWPAN 边缘路由启动后,自动发起 DHCP 请求,获取 IPv4 地址,即 192.68.1.185。

b)6LoWPAN 边缘路由器地址交换

6LoWPAN 边缘路由下面接入了一个节点,IPv6 地址为:2001::0212:4b00:01d3:8a87,该节点开启了两个任务,占

用两个端口,其中 5683 端口是 CoAP 协议使用的,12346 端口用作 UDP 传输,数据经过网关后,做 NAT64 转换:

```
[2001::0212:4b00:01d3:8a87+12346]
<----->
10000 [网关 192.168.1.185]
[2001::0212:4b00:01d3:8a87+5683]
<----->
10001 [网关 192.168.1.185]
```

因此,网关的 10000 端口就代表着这个节点的 123456 端口,网关的 10001 端口代表着该节点的 5683 端口,可以通过访问网关的端口来访问到节点。

c)节点经过网关发送数据给 UDP 服务器

图 6 所示为在电脑上运行的 UDP 调试工具的截图。作为一个 UDP 服务器,6LoWPAN 的节点通过网关发送数据给服务器,服务器能够收到数据,显示数据来源为:192.168.1.185:10000,其中 192.168.1.185 是网关的 IP 地址,而 10000 端口是 NAT 映射后的端口,对应的是[2001::0212:4b00:01d3:8a87+12346],这正是对应的 6LoWPAN 节点和端口。



图 6 UDP 调试工具

d)电脑通过 UDP 发送数据给节点

如图 7 所示,在 UDP 调试软件“当前连接”栏选择 UDP 连接,在数据 1 栏输入“aa bb cc dd”,点击发送,即可发送 UDP 数据到网关的 10000 端口,网关经过 NAT64/6to4 转换后,会将数据转发给 6LoWPAN 节点。

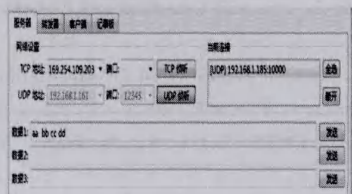


图 7 数据转发

6LoWPAN 节点接收到数据后,会通过串口将数据打印出来,节点正确收到数据“aa bb cc dd”。图 7 中 12345 是 UDP 服务使用的端口,12346 是 6LoWPAN 节点使用的端口,这是因为网关把 192.168.1.185:10000 反向映射为:[2001::0212:4b00:01d3:8a87+12346],因此节点打印的是 12346 端口。这表明方向 NAT64 转换以及方向数据传输正确。

(2)6to4 功能测试

6LoWPAN 网络接入互联网的 6LoWPAN 边缘路由器为 R1,远程 IPv6 服务器接入互联网的 6to4 路由器为 R2。由于 R1 为 6LoWPAN 边缘路由器自动识别网络环境,具有穿越 IPv4 公网访问远程 IPv6 服务器的功能,R2 是一般 6to4 路由器,因此需要配置才能使用。

在路由器 R2 上的配置命令为:

```
R2(config)# interface loop 2
R2(config-if)# ipv6 address 2001::2::1/64
```

```
R2(config-if)# exit
R2(config)# ipv6 unicast-routing
R2(config)# interface tunnel 0
R2(config-if)# tunnel source s1/0
R2(config-if)# tunnel destination 10.1.1.1
R2(config-if)# ipv6 address 2001::10::2/64
R2(config-if)# tunnel mode ipv6ip
```

说明:第一条命令是启用一个 tunnel;第二条命令是指定 tunnel 的源地址,即 R1 的 s1/0 接口;第三条命令为指定 tunnel 的目标地址,即 R2 的 s1/0 所对应的 IP 地址;第四条命令是在 tunnel 中另启一个网段,该网段为 2001::10::0;第五条命令为 tunnel 指定模式,即将 IPv6 的数据包封装到 IPv4 的数据包中。

到目前为止,R1 的 IPv6 网络与 R2 的 IPv6 网段之间还是不能通信,因为它们没有彼此的路由信息。因此还要分别在 R2 的 loop 和 tunnel 中启用路由,以最简单的 rip 路由为例进行演示。

在路由器 R2 上的配置命令为:

```
R2(config)# interface tunnel 0
R2(config-if)# ipv6 rip ctocio enable
R2(config-if)# interface loop 1
R2(config-if)# ipv6 rip ctocio enable
```

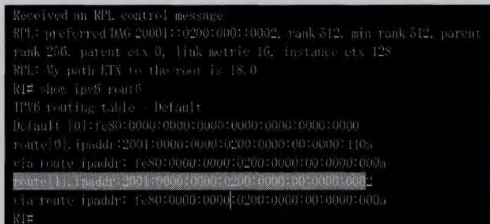


图 8 分别查看两台路由 IPv6 路由表

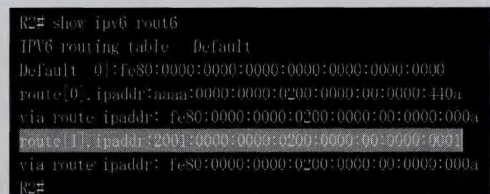


图 9 路由条目学习成功

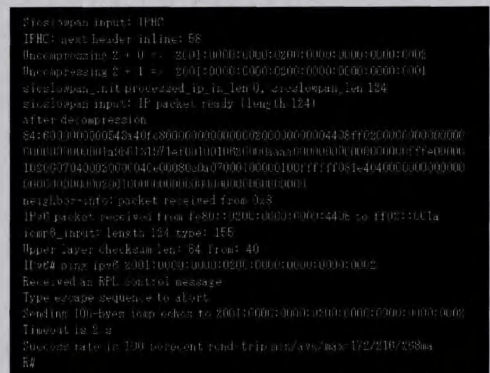


图 10 通过路由两边的 IPv6 通信成功

此时,可以查看两台路由器的路由表和路由条目,信息分别如图 8 和图 9 所示。从图 10 中可以看到两台路由通信成功的信息。

R2 配置完成后,可以看到 R1 与 R2 的通信信息,6LoWPAN 网络通过接入互联网的 6LoWPAN 边缘路由器可以成功访问远程的 IPv4 服务器。

### (3) 6LoWPAN 边缘路由运行 CoAP 协议测试

接入互联网是 6LoWPAN 相对于其它协议的重要优势, IETF 组织制定了基于 CoAP 的轻量级 Web 服务,能够与 HTTP 快捷互换。6LoWPAN 节点实现 CoAP 服务器,提供给外部访问,电脑作为 CoAP 的客户端,通过网关访问节点上的数据。电脑上安装 firefox 浏览器和 Copper 插件,这样就能够实现客户端的功能。

地址栏输入: coap://192.168.1.185:10001, coap 表示协议,192.168.1.185 是网关的 IP 地址,10001 对应的是节点的 5683 端口,即 CoAP 服务端。

Ping 节点: 点击 Ping 按钮,如图 11 显示,显示收到应答消息,RTT 时间为 82ms(数据从电脑经过 WIFI 路由器、6LoWPAN 边缘路由到达节点、再返回的时间)。

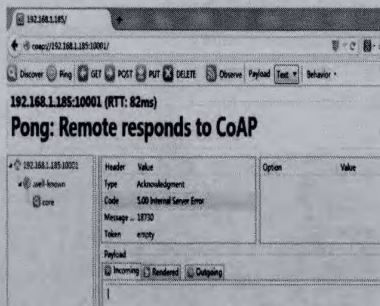


图 11 收到的应答信息

获取数据: 在地址栏输入 coap://192.168.1.185:10001/hello, 点击 GET 按钮, 6LoWPAN 节点返回“Hello World!”, 正确获取到数据。

远程控制 LED 灯: 地址栏输入 coap://192.168.1.185:10001/actuators/toggle, 点击 POST 按钮, 6LoWPAN 节点会点亮红色的 LED 灯, 再次点击 POST, 节点将会熄灭红色 LED 灯。

浏览器与节点交互数据, 可以以 Ping 的形式访问节点, 以 GET 的方式获取传感器数据、以 POST 方式控制远程节点, 进而实现信息采集与控制。同时, 整个过程采用 URL 标志节点的资源, 通过类似 HTTP 的 GET、POST、PUT 等命令进行操作, 操作方法与互联网类似, 因此可以与互联网无缝集成, 结合互联网、移动互联网, 形成互联网+物联网的大体系。

**结束语** 本文提出了一种适用于多种网络环境应用的 6LoWPAN 边缘路由器设计方法, 通过融合多种协议, 使之适应多种网络环境应用需求。通过实验测试和验证了它的可行性。除此之外, 6LoWPAN 边缘路由器作为传感网络接入互联网的接入设备, 可以很好地移植诸如 CoAP、SNMP 应用协议, 很容易实现对路由器的管理和配置功能, 特别适用于应用了大量网络节点的路灯控制、智能电表控制等领域, 随着物联网的兴起, 具有广阔的市场应用前景<sup>[16]</sup>。

### 参考文献

[1] 侯惠峰, 刘湘雯, 于宏毅, 等. 无线传感器网络与 IPv6 网络的互联方式研究[J]. 电信科学, 2006, 22(6): 56-62

Hou Hui-feng, Liu Xiang-wen, Yu Hong-yi, et al. Research on Strategies for Interconnecting Wireless Sensor Networks with IPv6 Network[J]. Telecommunications Science, 2006, 22(6): 56-62

[2] Adya A, Howell J, Theimer M, et al. Cooperative task management without manual stack management[C]// Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference. Monterey, CA, 2002: 289-302

[3] Edgar H C. 无线传感器网络: 体系结构与协议[M]. 王永斌, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2007: 323-332

[4] 童利标, 徐科军, 梅涛. 基于 IEEE 1451 的无线网络化智能传感器探讨[J]. 传感技术学报, 2002, 15(4): 368-373

Tong Li-biao, Xu Ke-jun, Mei Tao. Research on Wireless Networked Smart Sensor Based on IEEE 1451 Standard[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2002, 15(4): 368-373

[5] 张森, 叶晓慧, 王红霞. 基于 IEEE 1451.3 的 IPv6 网络传感器设计[J]. 电子器件, 2006, 29(1): 193-196

Zhang Sen, Ye Xiao-hui, Wang Hong-xia. IPv6 Networked Sensors Design Based on IEEE 1451.3[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2006, 29(1): 193-196

[6] Balakrishnan H, Seshan S, Amir E, et al. Improving TCP/IP performance over wireless networks[C]// Proceedings of the First ACM Conference on Mobile Communications and Networking. Berkeley, CA, 1995: 2-11

[7] Woo A. A new embedded web services approach to wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Boulder, Colorado, USA, 2006: 347-347

[8] 李津生, 洪佩琳. 下一代 Internet 的网络技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001

[9] Woo A, Tong T, Culler D. Taming the underlying challenges of reliable multi-hop routing in sensor networks[C]// Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York, USA, 2003: 14-27

[10] Wood A, Stankovic J, Zhou G. DEEJAM: Defeating energy efficient jamming in IEEE 802.15.4-based wireless networks[C]// Proceedings of IEEE SECON 2007. San Diego, CA: IEEE, 2007: 60-69

[11] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002). New York: IEEE, 2002: 1567-1576

[12] Yazar D, Dunkels A. Efficient application integration in IP-Based sensor networks[C]// Proceedings of the First ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings. Berkeley, CA, 2009: 43-48

[13] Ye W, Silva F, Eidemann J. Ultra-low duty cycle MAC with scheduled channel polling[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York, NY: ACM Press, 2006: 321-334

[14] 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

- [15] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005:35-50
- [16] 马祖长,孙怡宁,梅涛. 无线传感器网络综述[J]. 通信学报, 2004,25(4):114-124  
Ma Zu-chang, Sun Yi-ning, Mei Tao. Survey on Wireless Sensors Network[J]. Journal of China Institute of Communications, 2004,25(4):114-124
- [17] 李津生,洪佩琳. 下一代 Internet 网络技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2001
- [18] 王钦. 基于 ZigBee 技术的无线传感网络研究与实现[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版),2011,25(8):46-51  
Wang Qin. Research and Implementation of Wireless Sensor Network based on ZigBee[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science),2011,25(8):46-51

(上接第 214 页)

**结束语** 通信干扰严重地限制了蜂窝无线网络的性能。为了有效提升网络的能量效率,本文提出一种联合 QoS 约束及波束成形准则的蜂窝网络高效协作传输技术,采用了由宏蜂窝、飞蜂窝组成的异构蜂窝网络系统模型,通过基于纳什均衡 QoS 约束的高效协作传输技术,采用纳什均衡 QoS 约束把问题优化成波束成形和功率分配,并将 QoS 约束考虑进波束成形准则,改善网络的干扰状态,提高能量效率。与文献[11]和文献[12]的对比分析表明,本文算法在提高蜂窝网络的能量效率上取得了更好的效果。

### 参 考 文 献

- [1] Z Ying, J Chang-gang. A kind of routing algorithm for heterogeneous wireless sensor networks based on affinity propagation [C]//The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC). IEEE,2014:2481-2485
- [2] Xu C, Liu T, Guan J, et al. CMT-QA: quality-aware adaptive concurrent multipath data transfer in heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(11):2193-2205
- [3] Trestian R, Ormond O, Muntean G M. Energy-Quality-Cost tradeoff in a multimedia-Based heterogeneous wireless network environment[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2013, 59(2):340-357
- [4] Wu J, Shang Y, Qiao X, et al. Robust bandwidth aggregation for real-time video delivery in integrated heterogeneous wireless networks[J]. Multimedia Tools and Applications, 2013, 74(11):4117-4138
- [5] Al-Hamadi H, Chen R. Redundancy management of multipath routing for intrusion tolerance in heterogeneous wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2013, 10(2):189-203
- [6] Haldar K L, Ghosh C, Agrawal D P. Dynamic spectrum access and network selection in heterogeneous cognitive wireless networks[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2013, 9(4):484-497
- [7] 彭舰,徐彪,孙彦清,等. 基于 Sink 轨迹固定的异构延迟容忍网络数据传输机制[J]. 北京邮电大学学报,2014,37(2):53-57  
Peng Jian, Xu Biao, Sun Yan-qing, et al. Data transmission algorithm based on path-Fixed Sink in heterogeneous delay tolerant mobile sensor networks [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014, 37(2):53-57
- [8] 张琛,粟欣,王文清,等. 异构网络跨层协作传输技术研究[J]. 通信学报,2014,35(8):198-205  
Zhang Chen, Su Xin, Wang Wen-qing, et al. Research of cross-
- tier cooperative transmission technology in heterogeneous network[J]. Journal on Communications, 2014, 35(8):198-205
- [9] 刘唐,彭舰,杨进. 异构延迟容忍移动传感器网络中基于转发概率的数据传输[J]. 软件学报,2013,24(2):215-229  
Liu Tang, Peng Jian, Yang Jin. Data delivery for heterogeneous delay tolerant mobile sensor networks based on forwarding probability[J]. Journal of Software, 2013, 24(2):215-229
- [10] Lu S J, Chang R Y, Chung W H, et al. Realizing high-accuracy transmission in high-rate data broadcasting networks with heterogeneous users via cooperative communication[J]. Digital Signal Processing, 2014, 25(2):93-103
- [11] Wang Lei, Yang Yu-wang, Zhao Wei. Network-Coding-Based Energy-Efficient data fusion and transmission for wireless sensor networks with heterogeneous receivers [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014, 13(1):479-482
- [12] Navaie K, Valaee S, Sharafat A R. Optimum model-based non-real-time downlink data transmission in heterogeneous DS-CDMA cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(6):2357-2367
- [13] Alonso R S, Tapia D I, Bajo J, et al. Implementing a hardware-embedded reactive agents platform based on a service-oriented architecture over heterogeneous wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(1):151-166
- [14] Maia G, Guidoni D L, Viana A C, et al. A distributed data storage protocol for heterogeneous wireless sensor networks with mobile sinks[J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(5):1588-1602
- [15] Kwon O C, Song H. Cross-layer optimized multipath video streaming over heterogeneous wireless networks [C] // Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA), 2013 Asia-Pacific. IEEE, 2013:1-4
- [16] Tarnoi S, Kumwilaisak W, Saengudomlert P, et al. QoS-aware routing for heterogeneous layered unicast transmissions in wireless mesh networks with cooperative network coding[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2014, 2014(1):1-18
- [17] Trestian R, Ormond O, Muntean G M. Enhanced power-friendly access network selection strategy for multimedia delivery over heterogeneous wireless Networks[J]. TBC, 2014, 60(1):85-101
- [18] Manfredi S. Congestion control for differentiated healthcare service delivery in emerging heterogeneous wireless body area networks[J]. Wireless Communications, IEEE, 2014, 21(2):81-90
- [19] Amin R, Martin J, Deaton J, et al. Balancing spectral efficiency, energy consumption, and fairness in future heterogeneous wireless systems with reconfigurable devices[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(5):969-980