

轻量级 IPv6 邻居发现协议及在网关中的实现

缪剑峰,管有庆

(南京邮电大学 信息技术研究所,江苏 南京 210003)

摘要:轻量级 IPv6 邻居发现协议是 6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Network, 轻量级 IPv6 协议)的重要补充,旨在解决 6LoWPAN 无线传感网络初始化和网络维护过程中普遍存在的节点高消耗问题。文中归纳并总结了邻居发现轻量化的必要举措,在此基础上,提出了一套轻量级 IPv6 邻居发现协议在基于 Linux 操作系统的边界网关中的实现方案。通过在内核中邻居发现模块添加新特性,边界网关将负责处理大量原本需要传感节点分担的组网任务和网络维护任务,大大降低了域内节点开销。通过对原型系统的功能测试,方案完全符合协议标准,简单高效,并做到了与标准 IPv6 邻居发现协议的兼容。

关键词:6LoWPAN;邻居发现;边界网关;物联网;无线传感网

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)10-0058-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.10.014

Implementation of 6LoWPAN Neighbor Discovery Protocol in Border Routers

MIAO Jian-feng, GUAN You-qing

(Institute of Information Network Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: The 6LoWPAN-NDP (6LoWPAN Neighbor Discovery Protocol) is an indispensable supplement to the 6LoWPAN, which focuses on the conservation of nodes' energy and network resource in 6LoWPAN during the network initialization and maintenance. In this paper, the necessary measures of neighbor discovery lightweight are summarized. Based on it, put forward a realizing scheme of a lightweight IPv6 neighbor discovery protocol in border router based on Linux operating system. Through adding the new feature in neighbor discovery module in kernel, the border router will handle with the large amount of networking tasks and network maintenance tasks which originally needs sensor node share, greatly reducing the node overhead in domain. The benchmark test shows that the border router designed is up to standard with the 6LoWPAN-NDP. Its high efficiency and compatibility makes it available to apply in some real applications.

Key words: 6LoWPAN; neighbor discovery; border router; Internet of Things; WSN

0 引言

6LoWPAN 由 IETF 组织于 2007 年正式定稿发布,已成为物联网 IP 编址的统一标准^[1]。6LoWPAN 通过在链路层和网络层之间添加适配层,实现了 IPv6 报文在 802.15.4 网络中的传输。通过适配层对报文进行压缩与分片,6LoWPAN 降低了 IPv6 的网络损耗,使之适用于低功耗低节点性能的无线传感网络^[2-3]。6LoWPAN 已形成四个标准文档,2012 年 11 月发布的 6LoWPAN-NDP(6LoWPAN Neighbor Discovery Proto-

col,轻量级 IPv6 邻居发现协议)^[4],解决了 6LoWPAN 在网络初始化和网络维护过程中节点的高消耗问题,标志着 6LoWPAN 的成熟。

网络层协议特别是 NDP 一直制约着 6LoWPAN 协议栈的发展^[5],虽然现阶段国外已有将 6LoWPAN 应用于智能家居和智慧医疗领域的模型系统^[6-7],也出现了一些 6LoWPAN 网关原型系统^[8-9],但是上述系统在网络层中均直接采用了标准 NDP,过多的控制报文为传感节点带来了负担,也降低了传输效率。制定

收稿日期:2013-11-21

修回日期:2014-02-25

网络出版时间:2014-07-28

基金项目:江苏省高校自然科学基金研究计划项目(05KJD520146);南京邮电大学基金项目(NY212097)

作者简介:缪剑峰(1988-),男,硕士研究生,研究方向为信息技术的应用及实现;管有庆,副研究员,硕士生导师,研究方向为数据库、通信软件和下一代网络等。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140728.1221.009.html>

适于 6LoWPAN 的轻量级 NDP 刻不容缓,文献[10-12]为标准协议的形成做出了重要贡献。文献[10]主张通过减少组播报文来优化 ND 过程;文献[11]提出可通过数据链路层和网络层的协调处理,减少 ND 过程中网络洪范现象的发生,从而降低传感网络中的节点能耗;在此基础上,文献[12]通过引入多通道竞争机制,对上述方案进行了优化。6LoWPAN-NDP 刚发布不久,目前国内外尚无符合其标准的网关系统。

1 轻量级 IPv6 邻居发现协议

NDP 是 IPv6 的重要组成部分,是 IPv6 即插即用特性的技术支撑,位于 TCP/IP 协议栈中的第三层网络层,代替了 IPv4 协议栈中的 ARP(Address Resolution Protocol,地址解析协议)。主要功能包括:网关发现、IP 地址自动配置、网络参数自动配置、链路地址解析、下一跳确定、邻居不可达检测、重复地址检测等。NDP 定义了五种网络控制报文类型,分别为 RS(Router Solicit,路由请求)、RA(Router Advertise,路由通告)、NS(Neighbor Solicit,邻居请求)、NA(Neighbor Advertise,邻居通告)以及重定向。

标准 NDP 在最初设计时并没有轻量级的需求^[13],因此并不完全适用于 6LoWPAN,主要在于:

- 不支持 6LoWPAN 协议的部分新特性,如地址压缩、节点睡眠等。
- 会产生大量组播报文,造成节点能源浪费。
- 部分机制复杂,对节点的性能造成负担,降低了整个物联网感知层的效率。

针对上述存在的问题,6LoWPAN-NDP 在确保兼容性的前提下,对标准 NDP 进行了修改和简化。其主要特性为:

(1) 支持 6LoWPAN 头部压缩。

通过引入 6CO(6LoWPAN Context Option,上下文选项),建立上下文缓存表以支持 IPv6 的头部压缩。Context 即一个 4 bit 标识,在 6LoWPAN 标准中,用于在数据传输中取代 IPv6 长达 64 bit 的网络前缀,从而起到地址压缩的目的。

(2) 支持节点睡眠。

6LoWPAN-NDP 将节点路由寻找过程由网关触发改为节点自发,来支持节点睡眠机制。

(3) 统一编址方式。

6LoWPAN-NDP 规定采用前缀+EUI64(全球唯一链路地址)进行 IP 地址的无状态配置,取消了链路本地组播地址。

(4) 单播地址维护。

地址维护包括节点地址注册和 DAD(Duplicate Address Detection,重复地址检测)等。通过 ARO(Ad-

dress Registration Option,地址注册选项)和改进网关中的 NCE(Neighbor Cash Entries,邻居缓存表),6LoWPAN-NDP 将复杂的地址维护机制全部放在了网关中处理,减轻了节点负担,并消除了对组播的依赖。

(5) 可达性检测。

节点通过单播 NS 检测邻居的可达性,并禁止了会产生组播的重定向功能。

2 网关系统架构设计

2.1 系统架构

6LoWPAN-NDP 支持两种网络拓扑,分别为 mesh-under 和 route-over^[14]。在前者中,节点直接与边界网关连接,跳数永远为 1;而在后者中,节点并不与边界网关直连,而是通过内部网关转发,跳数大于 1。本设计旨在边界网关中实现 6LoWPAN-NDP,限于篇幅,选取 mesh-under 拓扑搭建实验平台。网络架构如图 1 所示。

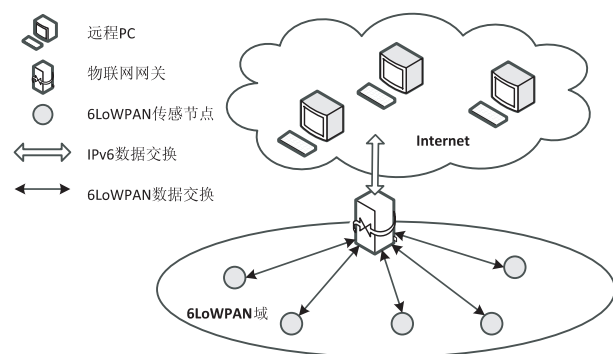


图 1 mesh-under 拓扑架构

在系统中,节点采用 Isense-sky430 开发板,网关为一台普通 PC,采用 ubuntu 10.4 作为操作系统,内核版本为 2.6.32。

Isense-sky430 开发板采用 TI 公司的 MSP430 F1611 处理器,片内存储容量为 48 kB, RAM 为 10 kB,并外置 1 MB flash ROM。配置 SHT11 温湿度传感器、S1087 可见光传感器等作为其传感模块支持扩展。板载 CC2420 作为 2.4 GHz IEEE 802.15.4 标准射频收发器。Isense-sky430 功耗低,功能全,满足了 6LoWPAN 无线传感网的基本要求。

由于 PC 机无法直接和 6LoWPAN 域直接通信,因此系统中 PC 端通过 USB 接口连接一块 Isense-sky430 开发板作为网络适配器。网关端的适配器驱动与 6LoWPAN 适配层的实现不在文中的讨论范围内。

2.2 交互逻辑

网关和节点邻居发现交互逻辑流程如图 2 所示。

节点初始化时,首先通过 EUI-64 构成链路本地地址,接着进行路由发现:组播发送携带 SLLAO(Source Link-Layer Address Option,源链路地址选项)

的 RS 报文以寻找域网关并通告链路本地地址。网关收到此 RS 消息后,以单播的 RA 报文作为回复。RA 需携带必要的配置信息,包括四个选项,分别为 SLLAO、6CO、PIO (Prefix Information Option, 地址前缀选项) 及 ABRO (Authoritative Border Router Option, 边界网关授权选项)。ABRO 的作用即宣告网关为边界网关;PIO 和 6CO 根据网关维护的地址前缀表和 Context 表中的表项逐个生成,可有多个。

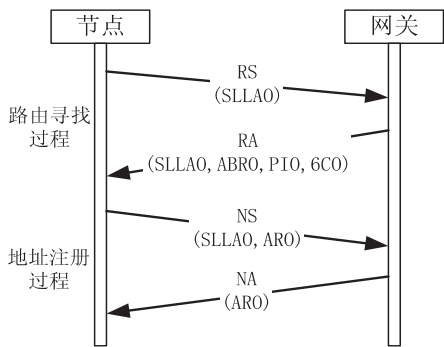


图 2 6LoWPAN-NDP 交互流程

节点成功发现路由后,将进行地址注册。节点会通过 PIO 携带的前缀信息结合 EUI-64 构造临时全球唯一地址,并封装成 ARO 选项,通过单播 NS 报文向网关注册。网关收到节点发来的 NS 消息后,记录其 ARO 中的 IP 地址,并查询 NCE;若 NCE 未满足且没有重复的地址项,则表示地址注册成功。网关将其添加至 NCE 中,并通过单播 NA 消息回复注册成功的 ARO 选项,网络初始化成功;若发现重复地址,则网关将通过 ARO 中的状态字段告知节点,节点将重新生成地址,重新进行注册。

节点接入网络后,当节点中的地址前缀、Context、默认路由等项即将过期时,节点还将向默认网关发送单播 RS 报文要求更新;而当节点的地址有效期即将过期时,节点将向默认网关发送单播 NS 报文以维持注册。

3 网关的实现

6LoWPAN-NDP 已在 Isense-sky430 中的 UIP6 协议栈获得支持,但在 Linux 中却没得到实现。Linux 操作系统虽然支持 IPv6 报文转发功能,但本身并不支持将自己配置成网关,内核中缺失一些网关行为的必要逻辑。将 PC 配置为 IPv6 网关,需安装开源的应用软件 RADVD。RADVD 运行于用户态,是对网关行为的补充。RADVD 会主动监听网络中的 RS 报文,根据用户设置的网关参数回复相应的 RA 报文将自己宣告为网关,并进行后续的维护。RADVD 目前并不支持 6LoWPAN-NDP。

在 Linux 网关中实现 6LoWPAN 主要从两部分考

虑:对于路由报文,应通过修改 RADVD 软件,使其支持 6CO、ABRO,并在用户态空间维护 Context 表;对于邻居报文,应通过修改 Linux 内核中的 IPv6 模块,使其支持 ARO,以及单播地址维护机制,并在内核态维护 NCE。需修改的文件为 ndisc.c, addrconf.c 及其相关头文件。

3.1 Context 的管理分发策略

Context 由网关自学习并配置,通过单播 RA 消息的 6CO 选项进行分发。6CO 中的 C 位为 Context 状态标记位,C=0 表示该 Context 只能用于解压缩,C=1 表示既可用于压缩也可用于解压缩。由于网关并不会主动发送组播 RA 来更新 6LoWPAN 域中的所有节点,为保证 LoWPAN 域中所有节点 Context 项状态的一致性,保证正常的通讯,本设计采用如下策略:

网关学习到新的 Context 项时,先将 C 置 0,并等待一段时间 T,保证此 Context 项遍历 6LoWPAN 域,才会将 C 置 1,允许利用此 Context 进行地址压缩。根据网络时延与网络规模,T 的值由人工设定。为保证一致性,T 应大于 Context 的默认生存周期,推荐值为 300 s。

在 Context 项到期后,应将此 Context 项置于过期状态,并将其生存周期设置为初始值的两倍。在这段时间里,节点和网关仍可通过此 Context 进行头部解压,但不可以进行头部压缩,网关也不会发送过期状态的 Context 项给节点。这段时间之后,该 Context 项才会被删除。

3.2 邻居缓存的实现

在标准 NDP 中,NCE 用来存储邻居项,更新邻居状态,以保证邻居节点通讯的畅通。6LoWPAN-NDP 要求 NCE 更加稳定,具有地址缓存功能,根据注册生命周期维护 6LoWPAN 域中所有节点的地址注册状态,继而实现单播 DAD 等复杂的机制。

Linux 中 NCE 机制非常复杂,它是多协议通用的,具体的实现在 neighbour.c 文件中,并不属于 IPv6 模块。考虑到兼容性,并不修改 neighbour.c,而是通过在 IPv6 模块中添加数据结构来实现。包括邻居表项 neigh_6lowpan 和对应的缓存表 neigh_table_6lowpan。因此对于 6LoWPAN-ND 邻居项,网关将维护两套结构。邻居表项的数据结构如下:

```
struct neigh_6lowpan
{
    struct list_head list;
    struct neighbour * neigh; //指向内核标准 NCE 中对应的邻居项
    __u8 state; //地址状态
    __u8 reg_count; //引用计数
    __u16 lifetime; //地址生存周期
}
```



```
struct timer_list lifetimer;//生存周期计数器
struct in_6_addr addr;//IPv6 地址
union
{
    __u8 eui_64[8];//for registered NCE
    __u8 addr_64[8];//for Tentative NCE
} lladdr;//链路地址
};
```

每一个 neigh_6lowpan 项都与标准 NCE 中的邻居项相对应,并将标准邻居项的引用计数加 1 以防止该
项在生命周期未到期时被标准 NDP 删除。在 neigh_6lowpan 中内置了生存周期计数器,当注册地址到期时,网关将同时删除两处邻居表项结构。

3.3 地址管理策略

6LoWPAN-NDP 规定节点通过携带 ARO 选项的单播 NS 报文来向网关注册、维护其 IP 地址。标准 Linux 内核中,网关接收到邻居发现报文后,会送至 NDP 模块进行处理,故应在 NDP 模块中增加 ARO 选项处理逻辑,如图 3 所示。网关收到携带 NS 的报文后,将检测其是否携带 ARO 选项,若无则该报文将继续由标准 NDP 处理。携带 ARO 的 NS 报文将进行合法性检查,并确保其为单播报文。合法的报文将继续检查其 ARO 选项中的生存周期字段:如果生存周期为 0,代表该选项为注销选项,将从 NCE 中删除相应邻居项;对于生存周期不为 0 的注册报文,网关将遍历 NCE,根据不同的查找结果回复携带不同状态字 ARO 的单播 NS 报文,状态字为 0 代表邻居项更新或创建成功,为 1 代表地址重复,为 2 代表缓存已满。而对于非

重复地址,网关将在 NCE 中根据 ARO 携带的信息创建相应的邻居项。

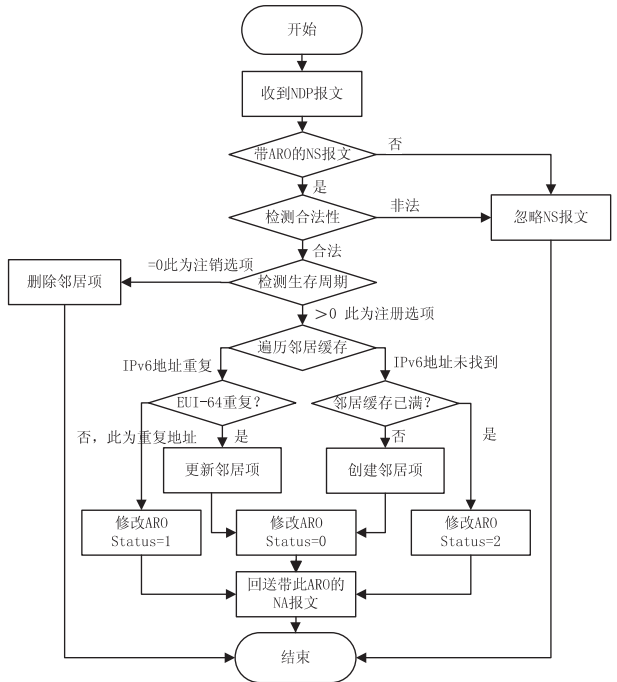


图 3 网关地址管理流程

4 测试与验证

测试网络拓扑如图 1 所示,测试方法为在网关端通过抓包软件抓取邻居发现报文,或分析程序运行日志,以验证网关的实现方案。

节点网络初始化时,在网关端截获的邻居报文如图 4 所示。限于篇幅,报文内容在此省略。

1 0.000000	fe80::212:7400:1467:ac69	ff02::2	ICMPv6	Router solicitation
2 0.002281	fe80::7600:14ff:fe67:a6d9	fe80::212:7400:1467:ac69	ICMPv6	Router advertisement
3 0.640199	2001:acf8:42ed:2590:212:7400:1467:ac69	fe80::7600:14ff:fe67:a6d9	ICMPv6	Neighbor solicitation
4 0.641345	fe80::7600:14ff:fe67:a6d9	2001:acf8:42ed:2590:212:7400:1467:ac69	ICMPv6	Neighbor advertisement
5 4.998850	fe80::7600:14ff:fe67:a6d9	fe80::212:7400:1467:ac69	ICMPv6	Neighbor solicitation
6 5.325427	fe80::212:7400:1467:ac69	fe80::7600:14ff:fe67:a6d9	ICMPv6	Neighbor advertisement

图 4 节点网络初始化时的邻居交互报文

可见节点网络初始化流程与第 2 节中的介绍基本吻合。需注意图中有两对 NS,NA 报文,其中第(5,6)号报文由标准 NDP 发出。它们并不携带 ARO 选项,只用来做邻居可达性检测,以确定 NCE 中的邻居可达性状态。从兼容性的角度出发,未屏蔽这些报文。此时节点的网络初始化已经完成,通过远程 PC 已经能 Ping 通 6LoWPAN 域的了。

接下来测试网关对节点重复地址的检测能力,为此将所有节点的后 64 位 IP 地址都配置为 8888:8888:8888:8888,当第一个节点初始化网络时,它会发送带 ARO 的单播 NS 报文进行地址注册。此时,网关 NCE 中没有该邻居项,将根据报文携带的信息自动生成邻居项,完成节点注册。图 5 所示为内核中的消息日志,注意第一行提示的"a 6lowpan neighbor created"。

```
945.696442] a 6lowpan neighbour created
945.696504] 6lowpan neighbour table <1>, state: registered, lifetime: 15360
945.696557] inet6 addr is: AC1F:604A:FF97:3024:8888:8888:8888:8888
945.696598] lladdr is: 6B:74:6F:70:2F:48:61:6C
945.696640] the length of 6lowpan neighbour table is 1
945.696661] 6lowpan neighbour table <1>, state: registered, lifetime: 15360
945.696664] inet6 addr is: AC1F:604A:FF97:3024:8888:8888:8888:8888
945.696667] lladdr is: 6B:74:6F:70:2F:48:61:6C
945.975921] ng debug::duplicate addr.
```

图 5 DAD 过程内核日志信息

接着,当第二个节点初始化网络时,网关发现第二个节点的地址与刚创建的邻居项重复,这是一个重复地址,如图 5 中最后一行提示的" duplicate addr"。对于重复地址的邻居项,网关并不会将其加入 NCE,而是即刻回复带 ARO 的单播 NA 报文告知节点,报文内容如图 6 所示,框起的部分为 ARO 选项,横线标注处代表状态字,为 1 即表示地址重复。

0000	00	20	ed	ef	e7	c5	00	0c	29	7d	ed	2f	86	dd	60	00
0010	00	00	00	28	3a	ff	fe	80	00	00	00	00	00	00	02	0c
0020	29	ff	fe	7d	ed	2f	fe	80	00	00	00	00	00	00	20	04
0030	17	b3	25	dd	0a	b2	88	00	64	5e	c0	00	00	00	fe	80
0040	00	00	00	00	00	00	02	0c	29	ff	fe	7d	ed	2f	83	02
0050	01	00	00	00	3c	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00

图 6 网关对重复地址的回复消息

5 结束语

6LoWPAN-NDP 是 6LoWPAN 技术的重要支撑,其标准化意味着 6LoWPAN 的成熟。据此,文中提出了一套在边界网关中实现 6LoWPAN 的方案,经过功能测试,证明该方案是可行的,也证明了 6LoWPAN-NDP 标准的可行性。该设计所搭建的网络平台采用的 mush-under 网络架构,未来还可深入研究在 route-over 拓扑下内部网关和边界网关的实现方案。

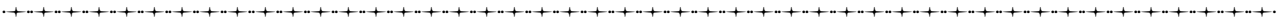
参考文献:

[1] IETF. Transmission of IPv6 packets over IEEE 802.15.4 networks[S]. RFC 4944,2007.

[2] 孙知信,唐苏宁.基于 IPv6 的无线传感网异构通信技术研究[J].中兴通讯技术,2012,18(3):6-10.

[3] 顾礼君,管有庆.基于剩余能量的无线传感网路由算法设计[J].计算机技术与发展,2012,22(10):75-78.

[4] IETF. Neighbor discovery optimization for IPv6 over low-power wireless personal area networks[S]. RFC 6775,2012.



(上接第 57 页)

plied and Computational Harmonic Analysis,2002,13(1):1-21.

[3] Jones D L,Parks T W. A high resolution data-adaptive time-frequency representation [J]. IEEE Trans on Acoustics, Speech, and Signal Processing,1990,38(12):2127-2135.

[4] 杜秀丽,沈毅,王艳.基于熵的 Gabor 变换窗函数宽度自适应选择算法[J].电子与信息学报,2008,30(10):2291-2294.

[5] Wexler J, Raz S. Discrete Gabor expansions[J]. Signal Processing,1990,21(3):207-220.

[6] 张贤达.现代信号处理[M].第 2 版.北京:清华大学出版社,2002.

[7] 魏道昀,祝美龙,陶亮.基于 DCT 的实值离散 Gabor 变换[J].电子与信息学报,2007,29(11):2783-2786.

[5] 陆刚,毛妙,张卫.6LoWPAN 邻居发现协议的研究[J].计算机应用与软件,2008,25(4):51-53.

[6] 付蔚,陈刚,王平,等.智能家居 6LoWPAN 家电控制系统研究[J].自动化仪表,2013,34(12):62-65.

[7] Jara A J,Zamora M A, Skarmeta A F G. HWSN6:hospital wireless sensor networks based on 6LoWPAN technology:mobility and fault tolerance management[C]//Proc of international conference on computational science and engineering. Vancouver:[s. n.],2009:879-884.

[8] Bjelica M Z,Mrazovac B,Teslic N,et al. Cloud-enabled home automation gateway with the support for UPnP over IPv4/IPv6 and 6LoWPAN[C]//Proc of 2012 IEEE international conference on consumer electronics. Las Vegas, NV: IEEE,2012:520-521.

[9] Damaso A V L,Domingues J P O,Rosa N S. SAGe:sensor advanced gateway for integrating wireless sensor networks and Internet[C]//Proc of 2010 IEEE 24th international conference on advanced information networking and applications workshops. Perth,WA:IEEE,2010:698-703.

[10] Stabellini L. Energy optimal neighbor discovery for single-radio single-channel wireless sensor networks [C]//Proc of IEEE ISWCS. [s. l.]:[s. n.],2008:583-587.

[11] Lee Ji-hoon. Cross-layered IPv6 neighbor discovery scheme over WLAN mesh networks[J]. IEEE Communication Letters,2009,13(12):992-994.

[12] Liu Zhen,Li Ying,Cheng Mingce,et al. Dual Channel Competition (DCC) scheme for neighbor discovery in wireless networks[C]//Proc of international conference on computer science and network technology. Harbin:IEEE,2011:23-28.

[13] 谢淘.6LoWPAN 邻居发现机制的研究[J].计算机科学,2009,36(10A):247-250.

[14] 王义君,钱志鸿,王雪,等.基于 6LoWPAN 的物联网寻址策略研究[J].电子与信息学报,2012,34(4):763-769.

[8] 况伟,陶亮.实值离散 Gabor 变换用于雷达信号的表示[J].计算机技术与发展,2010,20(10):131-136.

[9] Baraniuk R G,Flandrin P,Janssen A J E M,et al. Measuring time-frequency information content using the Renyi entropies [J]. IEEE Trans on Information Theory,2001,47(4):1391-1409

[10] Pothria P K. Statistical mechanics[M]. New York:Elsevier,1972.

[11] 杨雪特.熵的引入、深化与泛化——从克劳修斯熵到香农熵[J].内江师专学报,1991,4(21):62-65.

[12] Wang Qiang,Shen Yi. Performances evaluation of image fusion techniques based on nonlinear correlation measurement[C]//Proc of IEEE instrumentation and measurement technology conference. Como,Italy:IEEE,2004:472-475.

轻量级IPv6邻居发现协议及在网关中的实现

作者: [缪剑峰](#), [管有庆](#), [MIAO Jian-feng](#), [GUAN You-qing](#)
作者单位: [南京邮电大学 信息技术研究所, 江苏 南京, 210003](#)
刊名: [计算机技术与发展](#) 
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2014(10)

引用本文格式: [缪剑峰](#), [管有庆](#), [MIAO Jian-feng](#), [GUAN You-qing](#) [轻量级IPv6邻居发现协议及在网关中的实现](#) [期刊论文] - [计算机技术与发展](#) 2014(10)