

IPv6 物联网层次转发体系中的地址压缩

肖融¹ 孙波¹ 陈文龙² 肖永康¹ 魏云刚¹

¹(北京师范大学信息科学与技术学院 北京 100875)

²(首都师范大学信息工程学院 北京 100048)

(xiaorong@bnu.edu.cn)

Address Compression for Hierarchical Forwarding Architecture in IPv6 IoT

Xiao Rong¹, Sun Bo¹, Chen Wenlong², Xiao Yongkang¹, and Wei Yungang¹

¹(College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875)

²(College of Information Engineering, Capital Normal University, Beijing 100048)

Abstract As one of the most significant parts of “Internet +”, Internet of things (IoT) is being widely applied in various aspects of human society. IPv6 identification is the base of large-scale deployment and interconnection of IoT. Nevertheless, the 128-bit IPv6 address brings more storage and bandwidth consumptions for resource-constrained IoT. A novel compression mechanism-named IACH is proposed for the hierarchical IoT forwarding architecture, which mainly includes: removing invalid routing message at the end of IPv6 address, address stripping, and address extension. Moreover, the irregular outside IPv6 addresses can be translated into virtual addresses of IoT subnets by means of address mapping, which is compressed according the described mechanism. IACH is fully compatible with 6LoWPAN. Experiments and performance analysis show that IACH can significantly increase the real upper payload in packets transmission. In particular, the forwarding delay of IACH is shorter than standard 6LoWPAN for packets with the same length of IP-upper payload.

Key words Internet of things (IoT); hierarchical forwarding; address compression; IPv6; address mapping

摘要 作为“互联网+”计划的重要组成部分,物联网广泛应用于人类社会的各个方面。IPv6 节点标识是物联网大规模部署的基础。然而,128 b 的 IPv6 地址却给资源受限的物联网增加了存储、带宽等代价。面向物联网层次转发体系,设计了 IACH 地址压缩机制,包括:去除尾部无效寻径信息、地址剥离、地址扩展等。接着,提出了地址映射机制,将外部无规律的 IPv6 地址映射成物联网子网虚拟地址,使其可应用上述 IACH 机制进行压缩。该机制与现有 6LoWPAN 兼容。实验及性能分析表明:IACH 可大幅提升物联网报文传输的有效负载比例。对于相同长度的 IP 上层负载,IACH 转发时延略低于标准 6LoWPAN。

关键词 物联网;层次转发;地址压缩;IPv6;地址映射

中图法分类号 TP393

“互联网+”计划正迅速推动社会各行业的互联网进程,而物联网是“互联网+”最核心的技术之一,

它在智慧城市、物流管理、环境监测等多个方面发挥重要作用。物联网部署与现有互联网的广泛融合^[1],

收稿日期:2015-12-21;修回日期:2016-02-04

基金项目:国家自然科学基金项目(61373161,61272446,61300171)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61373161,61272446,61300171).

对物联网体系结构的统一性及规范性提出了更高的要求. 一体化节点标识是物联网技术规范、标准化的基础, IPv6 地址充当物联网节点标识是大势所趋. 然而, IPv6 地址也给资源受限的物联网带来了新的难题, 128 b 的地址格式使得物联网节点在存储、处理、协议带宽等多个方面增加了代价. 所以, 物联网环境中的 IPv6 地址压缩机制研究极为重要. 现有 6LoWPAN^[2] 的地址压缩技术虽能有效压缩 IPv6 地址存储, 但其在压缩对象的范围及可扩展等方面略显不足.

IPv6 物联网转发体系以层次树为主, 例如 RPL 协议^[3], 它已在典型物联网操作系统中实现^[4-5]. 文献^[6]为了提升自愈、可扩展等路由性能, 设计了一种 IPv6 轻量级树型层次转发模型 TFAD. 本文针对 TFAD 提出了层次结构地址压缩机制 (IPv6 address compression based on hierarchical structure, IACH). 它利用层次结构中父子节点 IPv6 地址的继承关系, 设计转发过程中 IP 地址的压缩存储机制, 以最经济的代价提供 IPv6 节点标识. 主要压缩方法包括: 去除尾部“0”值无效寻径信息; 下行传输时的 IPv6 地址剥离技术; 上行传输时的 IPv6 地址扩展技术. 另一方面, 由于访问物联子网的外部 IPv6 地址范围大、无特定规律, 导致 IP 地址压缩困难. 提出了基于网关的地址映射机制, 将外部 IPv6 地址映射成物联子网虚拟地址, 再应用前述 IPv6 地址压缩机制对虚拟地址进行压缩. 地址映射只在资源丰富、处理能力较强的网关(根节点)实施, 对于通信过程中的其它物联网节点完全透明. 而且, IACH 机制基于 6LoWPAN 协议扩展设计实现, 兼容现有 6LoWPAN 功能. 基于真实节点的实验及性能分析表明: IACH 地址压缩机制大幅增加了物联网数据传输的有效负载比例; 对于相同长度的 IP 上层负载, IACH 转发处理时延略低于标准 6LoWPAN.

1 相关研究

IP 协议具有非常好的开放性, 它是 TCP/IP 协议栈结构的核心^[7], 通过 IP 来统一标识物联网节点已得到业界的普遍认同. 然而, 互联网的迅猛发展导致全球 IPv4 地址严重缺乏^[8], 而物联网对 IP 标识的大量需求, 使得上述问题更为严峻. 面向下一代互联网的 6 版网际互联协议标准 (IPv6 协议)^[9]将地址位长度扩充为 128 b, IPv6 标识的绝对数量达

到 IPv4 数量的 2^{96} 倍. 所以, IPv6 地址作为物联网节点的标识是大势所趋.

IEEE 802.15.4 标准^[10]描述了低速无线个域网 (low-rate wireless personal area network, LR-WPAN) 的物理层及媒体接入控制层协议规范, 其协议复杂度较低、运行成本小, 适合传感节点间的低带宽传输. 基于 802.15.4 的 IPv6 报文传输面临的一个重要问题是: 链路层传输的每个数据帧承载的有效数据太少. 802.15.4 协议帧长度不超过 127 B, 链路层 MAC 帧头最大为 25 B, MAC 安全头最大为 21 B. 每个数据帧中 IP 报文只有少量的存储空间. 考虑 40 B 的 IPv6 报头以及传输层头部信息 (TCP 为 20 B、UDP 为 8 B), 应用层协议所能传输的信息就极为有限. 所以, 基于 802.15.4 的 IPv6 报文传输必须使用压缩技术提高传输性能.

此前的 IP 压缩技术研究, 如 ROHC^[11], 主要基于有状态的数据流进行压缩, 核心思想是去除报文中属于同一数据流的公共信息. 这种压缩技术只对生存期较长的数据流有意义, 不适用数据传输少且不太频繁的低功耗有损网络. 最初基于 802.15.4 的 IP 压缩技术由文献^[12]提出, 包括 HC1 和 HC2 算法. 之后, 压缩技术又由文献^[13]优化扩展: 使用共享上下文对全局地址压缩、对流量类别和流标签单独压缩. 6LoWPAN 工作组针对 IPv6 头部提出的 LOWPAN_IPHC 编码格式是目前最被各界认可的压缩算法.

6LoWPAN 压缩技术主要实施 3 个方面的工作: 1) 去除不同协议层之间的冗余信息; 2) 省略 IPv6 头部中基本不变化的字段或压缩取值范围较小的字段; 3) 利用共享上下文信息, 压缩部分传输内容.

6LoWPAN 存在如下局限或不足: 1) 只对无状态自动生成的全局 IPv6 地址或本地链路地址 (Link local 地址) 压缩效果较好. Link local 地址只在单跳链路传输时使用, 使用范围很小; 而无状态自动全局 IPv6 地址没有层次性, 在物联子网中无法基于子树进行地址聚合, 无法支撑高效的层次路由. 2) 没有提供物联子网外部 IPv6 地址的压缩方法. LOWPAN_IPHC 规范中, 对于外部地址, 如果基于上下文状态可压缩至 64 b, 否则就只能携带 128 b 完整地址传输, 压缩效果不理想. 3) 压缩机制的可扩展性不强. 该规范对主机位给出了典型长度的限制, 如 64 b 或 16 b, 不支持更灵活的长度变化. 本文工作在以上 3 个方面进行了改进或优化.

无论是早期的无线传感器网络还是现在的物联网,层次体系都是最广泛使用的路由转发结构^[14].层次结构中,物联网节点被划分成多个小组,每组的组员节点与组头节点严格遵循层次隶属关系,组员总是通过组头与外部进行通信. RPL 路由体系^[2]与广泛使用的分簇路由^[15]都属于层次路由. 作者前期完成的轻量级树型层次转发模型 TFAD^[5],支持 IPv6 地址在子树范围内高度聚合,并提供了故障后快速恢复机制,本文工作正是基于 TFAD 展开.

2 地址压缩模型

首先对 TFAD 模型进行简要介绍. TFAD 层次转发树中,根节点被称为网关节点,如图 1 中的节点 1. 网关节点的层数为 0,各节点的层数等于其父节点的层数加 1. 层数为最大层次数 $L_{\max}$ 的节点称为

底层节点,否则称为非底层节点. 每一层兄弟节点的 IPv6 地址通过层次比特位(layer bit, LB)进行标识. 图 1 是一个层次转发结构示例,该转发树的层次比特位为 8 b,通过层次比特位的不同取值来标识各自的子树. 如节点 2~4 的层次比特位为 IPv6 地址的第 65~72 位,分别取值 0x01,0x02,0xFF 标识不同的子树;节点 5,6 的层次比特位为 IPv6 地址的第 73~80 位. 另外,每个节点继承了父辈节点的地址范围,在父节点地址范围的尾部加上自己的层次比特位,就是该节点的地址范围. 例如,节点 3 的子树地址范围为“2500::0200:0:0:0/72”,节点 5 继承父节点 3 的地址范围,再加上自身的层次比特位 0x01,其子树地址范围为“2500::0201:0:0:0/80”. 每个节点的地址是在自己的地址范围后面加 0 补足 128 位即可自动生成,节点 3 地址为“2500::0200:0:0:0/64”,节点 5 地址为“2500::0201:0:0:0/64”.

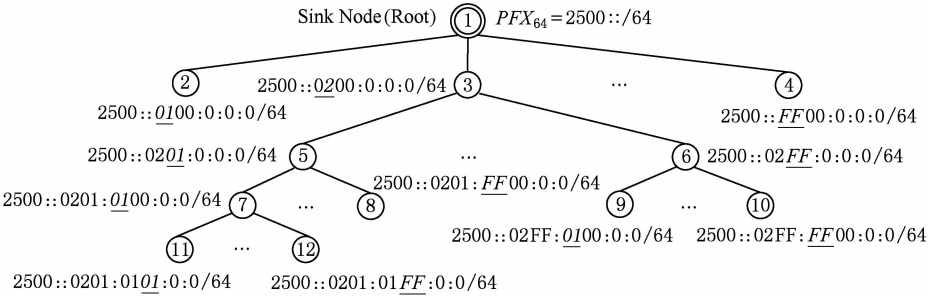


Fig. 1 Example of hierarchical forwarding tree.
图 1 层次转发树示例

定义 1. 有效寻径地址位. 层次转发树中,从网关节点到节点 N_i 各级层次比特位组成的部分被称为节点 N_i 地址的有效寻径地址位 VA (valid address bits for routing),它在层次转发树中可唯一标识节点. VA 占用的位数被称为有效寻径地址位数 VAN (VA number). 本文地址体系中,有: $0 < VAN \leq 64$. 根节点没有 VA 及 VAN 的概念.

图 1 中,节点 3 的 $VA = 0x02$, $VAN = 8$; 节点 12 的 $VA = 0x020101FF$, $VAN = 32$. 图 2 是图 1 的简化图,只保留了节点的有效寻径地址位.

对节点有效寻径地址位的长度进行分析,令物联网节点转发树所支持的最大层次数为 $L_{\max}$,任一节点 N_i 所在层数为 $N_i.lay$,令第 j 层的层次比特位为 $LB[j].n$,则节点 N_i 的有效寻径地址位数为

$$VAN(i) = \sum_{j=1}^{N_i.lay} LB[j].n. \tag{1}$$

显然,层次转发树中层数越小的节点,对应 VAN 值越小,底层节点(层数为 $L_{\max}$)的 VAN 值最大.

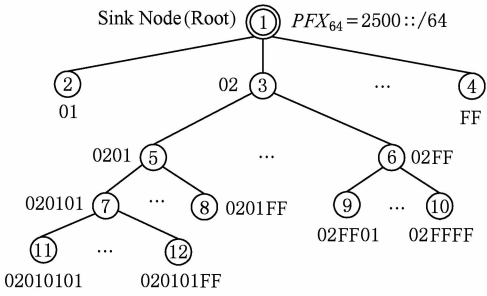


Fig. 2 Simplified structure of hierarchical forwarding tree.
图 2 层次转发树简化结构

节点标识的核心功能就是网络寻径,为确保物联网内针对节点的寻径能正常进行,给出地址压缩的基本原则:1)针对源地址,需确保最终收到该报文的节点能获得源节点全部有效寻径地址位,保证反向寻径能正常完成;2)针对目的地址,报文首次出现在物联网时,目的地址拥有目的节点完整的有效寻径地址位,确保报文顺利传输到达目的节点.

LACH 压缩机制的相关定义如下:

定义 2. 地址剥离. 将 16 进制原始地址信息 AB , 剥离高位部分信息 A , 定义为 $Addr_strip(AB, A)$. 例如 $Addr_strip(0x1234, 0x12) = 0x34$.

定义 3. 地址扩展. 在 16 进制原始地址信息 A 的前面增加 16 进制信息 B , 定义为 $Addr_extend(A, B)$. 例如 $Addr_extend(0x3456, 0x12) = 0x123456$.

定义 4. 去除尾部 0 值. 将 16 进制原始地址信息 A 末尾的 k 个位的 0 值去掉, 定义为 $Addr_tail0_del(A, k)$. 例如:

$$Addr_tail0_del(0x12340000, 16) = 0x1234.$$

定义 5. 补足尾部 0 值. 在 16 进制原始地址信息 A 的末尾, 添加 k 个位的 0 值, 定义为 $Addr_tail0_add(A, k)$. 例如 $Addr_tail0_add(0x1234, 16) = 0x12340000$.

定义 6. 顶点转发. 树型结构的物联子网内部传输时, 由上行转为下行的转发处理, 被称为顶点转发.

基于上述定义, 提出了报文在物联子网传输过程中的 3 种 IPv6 地址压缩机制.

压缩技术 1: 源/目的 IPv6 地址去除尾部“0”值. 层次转发树中的非底层节点, 其 IPv6 地址在报文传输中末尾总携带若干连续的 0 值, 它们是地址主机位中去除有效寻径地址位之后的剩余部分, 在物联子网内部寻径时不起作用, 传输时可省略. 例如, 图 1 中节点 8 地址的后 40 位 0 值, 在物联子网内传输时可省略.

压缩技术 2: 报文中目的 IPv6 地址剥离技术. 包括以下规则: 1) IPv6 报文在树型拓扑下行传输(向叶子节点方向)过程中, 每经过 1 个转发节点, 报文目的 IPv6 地址便可去除 1 段层次比特位; 2) 若外部报文经过网关(即根节点)向子网内部转发, 则剥离目的 IPv6 地址的 64 位物联子网网络前缀; 3) 顶点转发(上行转下行)时, 报文目的 IPv6 地址要剥离顶点节点的有效寻径地址位.

层次转发树的下行传输寻径, 本质上就是逐层根据报文目的 IPv6 地址中的层次比特位定位子树. 对于已经完成匹配的地址信息, 后续传输中可以将其从 IP 信息中剥离出来, 从而实现 IPv6 传输的实时地址压缩. 可以看出, 层次转发树下行传输中, 某节点 N_i 收到报文的 IPv6 地址信息中, 只包含节点 N_i 及后续子孙节点的层次比特位.

以图 2 举例, 节点 8 向节点 12 发送报文, 初始报文的目的地址为节点 12 的完整有效寻径地址位:

0x020101FF. 节点 5 做顶点转发, 剥离目的地址中节点 5 的有效寻径地址位 0x0201, 变为 0x01FF. 此后, 节点 7 转发时从目的 IP 中剥离其层次比特位 0x01, 节点 12 收到报文的目的 IP 为 0xFF.

压缩技术 3: 报文 IPv6 源地址扩展技术. 包括以下规则: 1) IPv6 报文在树型拓扑上行传输(向根节点方向)过程中, 每经过 1 个转发节点, 源 IPv6 地址扩展 1 段层次比特位; 2) 若经根节点向子网外部转发, 则对源 IPv6 地址增加 64 位物联子网前缀; 3) 顶点转发时, 报文源 IPv6 地址需扩展顶点节点的有效寻径地址位.

报文的上传传输是逐层向父节点转发报文的过程, 发送节点的 IP 地址正是由这些祖辈节点的层次比特位组成. 所以, 报文源 IP 地址可以在上行传输过程中由祖辈节点逐级扩展, 从而实现 IP 地址信息的最小化存储.

图 2 中, 节点 12 向节点 8 发送报文, 上行传输时初始源 IPv6 地址为 0xFF. 经节点 7 转发后, 报文源地址扩展为 0x01FF. 接着, 在节点 5 实施顶点转发, 源地址需增加节点 5 的有效寻径地址, 扩展为 0x020101FF.

3 算法设计

物联子网内部通信时, 可直接使用尾部 0 值已去除的地址进行节点标识及寻径. 所以, 去除尾部 0 值只发生在报文经网关转发到物联子网时实施. 去除尾部 0 值, 关键是计算报文目的 IP 的有效寻径地址位数, 算法中通过寻找第 1 个等于 0 的层次比特位来确定有效寻径地址位的最后位置. 相反, 网关节点将物联子网内的报文转发到外部时, 需要补足尾部的 0 比特位.

上述 IPv6 地址压缩技术通过实施在不同设备的算法来完成.

算法 1. 网关实施地址压缩.

令物联子网 64 位前缀为 PFX_{64} , $LB[j]$. b 为第 j 层节点的层次比特位在 128 位 IPv6 地址中的起始位置. 算法 1 核心思想如图 3 所示.

步骤 1. 接收报文, 根据目的 IPv6 地址查转发表确定报文处理行为.

步骤 2. 若是物联子网外部向内部转发(根据报文明出/入接口进行判断), 压缩 IPv6 地址, 执行步骤 3; 若是物联子网内部报文向外部转发, 执行步骤 5.

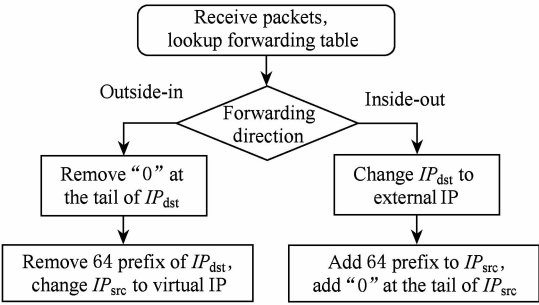


Fig. 3 Address compression in gateway.

图3 网关实施地址压缩

步骤3. 实施目的IP去除尾部0值操作.

步骤3.1. 初始化 $j=2$. 因为第1层层次比特位不为0, 只有后续描述的虚拟地址的第1层层次比特位为0, 但它并不是尾部0值, 不能去除.

步骤3.2. 取 IP_{dst} 中的第 j 层的层次比特位为 A , 它是 IP_{dst} 从 $LB[j].b$ 位开始的连续 $LB[j].n$ 位.

步骤3.3. 若 $A \neq 0$, 执行步骤3.4; 若 $A=0$, 则可去除 IP_{dst} 中从第 $LB[j].b$ 位到末尾的所有0值, 即 $Addr_tail0_del(IP_{dst}, (128-LB[j].b))$, 执行步骤4.

步骤3.4. 若 $j=L_{max}$ (最后的层次比特位), 表示 IP_{dst} 尾部并没有无效的0值, 执行步骤4; 否则, $j++$, 跳转执行步骤3.2.

步骤4. 将报文目的IP地址的64位前缀剥离: $IP_{dst}=Addr_strip(IP_{dst}, PFX_{64})$, 将源IP转换为物联网子网内部虚拟地址(见算法3地址映射), 算法结束.

步骤5. 报文目的IP地址转换为外部IP地址(见算法3地址映射).

步骤6. 将报文源IP地址扩展64位前缀: $IP_{src}=Addr_extend(IP_{src}, PFX_{64})$, 获取 IP_{src} 的位数为 k , $Addr_tail0_add(IP_{src}, 128-k)$, 算法结束.

算法2. 非网关节点实施地址压缩.

令该节点 N_i 的有效寻径地址位为 $VA(i)$, 所占比特位数为 $VA_N(i)$, 层次比特位的值为 $N_i.val$, 子树地址范围为 $ARST[i].len$. 本算法不分析报文目的地址为 N_i 的情况, 这由传统处理完成, 算法核心思想如图4所示.

步骤1. 节点 N_i 接收IP报文, 根据源MAC地址判断上一跳身份, 如报文来自父节点则执行步骤2, 如报文来自子节点则执行步骤3.

步骤2. 此时为下行传输, 将 N_i 的层次比特位

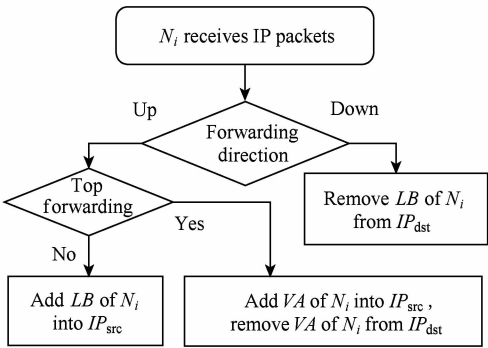


Fig. 4 Address compression in forwarding node.

图4 转发节点地址压缩

从报文的目的IP地址中剥离: $IP_{dst}=Addr_strip(IP_{dst}, Ni.val)$, 算法结束.

步骤3. 此时为上行传输, 如果节点的所辖地址范围 $ARST[i]$ 与报文目的地址的前 $ARST[i].len$ 位相等, 表示该节点将实施顶点转发, 上行转下行, 执行步骤4; 否则继续上行传输, 执行步骤5.

步骤4. 将 N_i 的有效寻径地址位扩展到报文源IP地址中: $IP_{src}=Addr_extend(IP_{src}, VA(i))$, 将 N_i 的有效寻径位从报文目的IP地址中剥离: $IP_{dst}=Addr_strip(IP_{dst}, VA(i))$, 算法结束.

步骤5. 将 N_i 的层次比特位扩展到报文源IP地址中: $IP_{src}=Addr_extend(IP_{src}, Ni.val)$, 算法结束.

4 报文格式设计

上述3种地址压缩技术面临的一个问题是: 各物联网节点IPv6地址的长度是可变的, 而且同一报文在传输过程中地址长度也不断发生改变. 因此, IACH机制需要在报文中设计专门的地址长度字段.

物联网网内部传输时, 节点地址长度大于0且小于等于64b. 压缩后地址的长度以8b(1B)为单位进行描述, 3个比特足以存储压缩后的IPv6地址长度, 但为了处理方便, 我们用半个字节(即4b)来存储压缩后的IPv6地址长度. 所以报文中源、目的地址长度总共需要1B的描述. 例如, 长度字段为0x35, 表示报文中源IPv6地址长度为3B(24b), 目的IPv6地址长度为5B(40b).

考虑与现有典型系统的兼容, 设计了基于6LoWPAN协议的IACH报文存储格式. 6LoWPAN机制中, IPHC压缩格式有8b的固定字段: 1) CID(1b)是上下文标识符位, 当CID位为1时在DAM字

段后存储 8 b 的上下文索引值(源、目的 IP 各 4 b);2) SAC(1 b)与 SAM(2 b)共同描述源 IPv6 地址压缩状态;3)DAC(1 b)与 DAM(2 b)共同描述目的 IPv6

地址压缩状态;4)M(1 b)表示目的 IPv6 地址是否为组播地址. IACH 机制中,修改协议格式实现本文压缩技术,如图 5 所示:

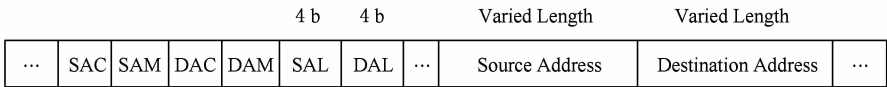


Fig. 5 Compression address format in 6LoWPAN packet.

图 5 6LoWPAN 报文中地址压缩存储格式

SAC 为 0 且 SAM 为 00 表示报文实施了 IACH 机制的源地址压缩,4 b 的 SAL 存储源地址的长度,报文携带变长的源 IP 地址.

DAC 为 0 且 DAM 为 00 表示报文实施了 IACH 机制的目的地址压缩,4 b 的 DAL 存储目的地址的长度,报文携带变长的目的 IP 地址.

在原有 IPHC 压缩格式中,上述 SAC 为 0 且 SAM 为 00 和 DAC 为 0 且 DAM 为 00 的描述均表示无状态压缩情况时携带完整的 128 b 源、目的地址. 本文 IACH 机制中,已不需要携带 128 b 地址,所以利用该标志表示 IACH 压缩. 例如,图 2 中节点 12 向节点 9 发送报文,IACH 机制导致报文在传输过程

中地址也不断发生改变,变化过程如图 6 所示. 方框描述了传输过程源/目的地址长度及内容. 第 1 项为 SAL,第 2 项为 DAL,第 3 项为压缩后的源 IPv6 地址,第 4 项为压缩后的目的 IPv6 地址. 例如,转发第 1 跳,节点 12 向节点 7 发出的报文中,源地址为 0xFF 且长度为 1 B,目的地址为 0x02FF01 且长度为 3 B,所以 6LoWPAN 报文中的源、目的地址可存储为:0x1 3 FF 02FF01.

需要说明:IACH 压缩机制中,当层次比特位小于 8 时,报文中 IP 地址长度可能不是整数个字节,此时报文中的地址信息需要增加填充位.

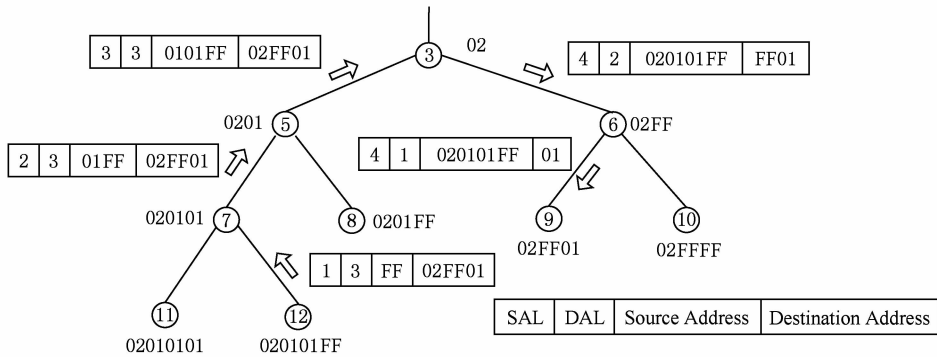


Fig. 6 Changes of content and length of packets during transmission.

图 6 报文传输过程中地址内容及长度的变化

5 外部地址动态映射

地址剥离、地址扩展等技术能高效压缩物联网范围的 IPv6 地址. 然而,当外部系统与物联网节点通信时,现有机制难以针对物联网外部 IPv6 地址实施压缩传输,因为外部地址范围太大,不但 64 b 主机位杂乱无规律,64 b 前缀也完全无章可循.

本文提出了基于地址映射的外部地址压缩方法,网关节点将物联网外部 IPv6 地址映射成规则的、易压缩的内部 IPv6 地址,确保物联网内传输报文时地址压缩的高效性. IACH 机制预留部分内

部 IPv6 地址形成“地址池”,专用于外部地址映射. 外部 IPv6 地址在物联子网传输时临时映射到“地址池”中的某一个地址,本文称这些预留的内部地址为虚拟 IPv6 地址(V_Addr).

设计虚拟地址集合为层次转发树中第 1 层层次比特位为 0x00 的子树所辖节点对应的地址(真实物联网节点不使用这些地址),对应节点被称为虚拟节点(V_Node). 层次转发模型中虚拟地址没有被分配给真实节点,该类地址的数量可达 2^{56} . 图 7 中椭圆范围内的着色节点就是虚拟节点,对应的地址为虚拟地址. 例如,虚拟节点 V_Node_A 对应地址 $PFX_{64}:0001::/64$ (压缩后为 0x0001),虚拟节点

V_Node_D 对应地址 $PFX_{64}:0002:0100::/64$ (压缩后为 $0x000201$).

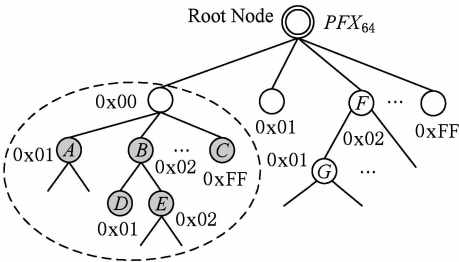


Fig. 7 Virtual address in IoT subnet.
图 7 物联子树中的虚拟地址

当然,用于映射的虚拟地址数量并不需要太多,而且也不是越多越好,主要有 2 个方面考虑:

- 1) 虚拟地址数量只需支撑同一时刻与物联子网节点通信的外部系统 IPv6 地址数量.假如地址为 $IP_{6_{ex}}$ 的外部系统同时与多个物联网节点通信,只需使用 1 个虚拟地址,也只会产生 1 条地址映射项.
- 2) 地址池容量可根据实际情况配置,容量太大会给地址映射的实现带来过多负载.虚拟地址的获取、释放以及映射项查找等操作的效率,都与地址池的容量成反比.

虚拟地址标识外部系统,一旦在报文中压缩存储后,其在物联子网不同层节点的传输过程中会一直保持不变,不会出现地址剥离或地址扩展情况.令某虚拟地址对应的子树节点为 N_i ,则其压缩后存储所占比特位数就是它的有效寻径地址位,参见式

$$(1), \text{存储的位数为 } \sum_{j=1}^{N_{i,lay}} LB[j].n. \text{ 显然,应尽量选择树结构中高层节点充当虚拟地址,确保尽量少的存储消耗.通常,同时访问一个物联子网的外部系统数量不会太多,可利用层数为 2 的节点(如图 7 的 A, B, C 节点)就可满足需求.此时,可用的层虚拟节点数量为 255,虚拟地址的压缩存储只需 16 b.}$$

定义 7. 外部地址映射.物联网网关构建的外部 IPv6 地址 $IP_{6_{ex}}$ 与物联子网内部 IPv6 虚拟地址 V_Addr 的对应关系,称为外部地址映射 (external address mapping, EAM),记为

$$EAM:V_Addr \leftrightarrow IP_{6_{ex}}.$$

不同时间可能有多个外部地址对应同一个虚拟地址,但某一时刻该映射必定是一对一映射关系.

地址映射相关的处理都在网关实施,描述如下:

算法 3. 网关实施外部地址映射.
令全部虚拟地址集合为 S_{all} (默认 255 个地址),

当前可用的虚拟地址集合为 S_{avl} ,映射项集合为 S_{cam} ;初始时有: $S_{avl} = S_{all}$, $S_{cam} = \varnothing$.本算法不分析报文目的地址为网关的情况,核心思想如图 8 所示:

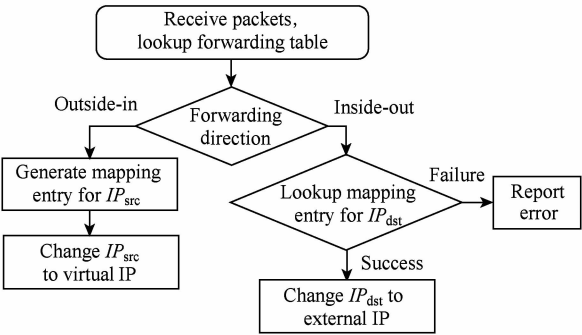


Fig. 8 External Address mapping.
图 8 外部地址映射

步骤 1. 物联网网关接收 IP 报文,根据目的 IP 查表确定报文处理行为.

步骤 2. 若是将物联子网外部报文向内部转发,执行步骤 3;若是将物联子网内部报文向外部转发 (此时目的 IP 为虚拟地址,形如 $0x00 \dots$),执行步骤 5.

步骤 3. 取出报文源 IP 为 $IP_{6_{src}}$,从集合 S_{avl} 中获得任一地址 V_Addr ,并生成映射项 $V_Addr \leftrightarrow IP_{6_{src}}$;同时, $S_{avl} = S_{avl} - \{V_Addr\}$, $S_{cam} = S_{cam} + \{V_Addr \leftrightarrow IP_{6_{src}}\}$.

步骤 4. 修改报文的源 IP 地址为 V_Addr ,并继续后续转发处理,算法结束.

步骤 5. 取出报文目的 IP 地址,令其为 $IP_{6_{dst}}$ (一个虚拟 IPv6 地址),在 S_{cam} 中查找其对应的映射项.

步骤 6. 若查找失败,报错,算法结束;否则,找到映射项 $IP_{6_{dst}} \leftrightarrow IP_{6_{ex}}$,执行步骤 7.

步骤 7. 将报文目的 IPv6 地址由 $IP_{6_{dst}}$ 更改为 $IP_{6_{ex}}$,继续后续转发处理,算法结束.

说明,外部地址映射和物联子网地址压缩都在网关融合实施,但为了便于理解,本文分别进行了描述.

上述地址映射处理性能主要与地址映射项查找关联,由于虚拟地址数量不多,映射表以一维数组形式存储.如图 9 所示,一次内存访问可完成映射项查询.当然,特殊场景中如有较大的并发外部访问数据流,则需要优化上述映射表结构,简单的 HASH 存储就可完成,本文不做详述.

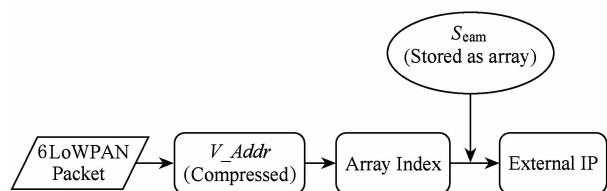


Fig. 9 Storage of mapping table for virtual address.

图9 虚拟地址映射表存储

此外,针对地址映射项需要有超时删除及保活机制.设定单条地址映射项的空闲超时时间为 T_m ,若 T_m 时间段无数据流匹配该映射项就将其删除.另外,也需设定映射项保活机制,只要转发过程中使用了某映射项,其超时时间就恢复到 T_m .

动态地址映射特征包括:1)虚拟地址与真实物联网节点的地址属于同一个 64 b 前缀,使得物联网内的协议报文全部属于同一个网络前缀,所有传输只需关注 IP 地址的后 64 b 主机位;2)地址映射项存储和地址转换都在网关处理,映射机制对普通物联网节点透明;3)使用的虚拟地址压缩效果极高,128 b 的外部地址通常只占用 16 b 的存储,可获得高达 8 的压缩比;4)支持地址动态映射,可以使用相对较少的虚拟地址实现其与更多外部地址的转换,从而提升网关中地址映射模块的实现效率.

总结 IACH 机制中各角色的工作如下:

- 1) 上行转发节点.源 IP 地址扩展层次比特位.
- 2) 下行转发节点.目的 IP 地址剥离层次比特位.
- 3) 顶点转发节点.源 IP 地址扩展有效寻径地址位,目的 IP 地址剥离有效寻径地址位.
- 4) 网关.向物联网内部转发流量时,目的 IP 去尾部 0 值及剥离前缀,源 IP 实施地址映射;向物联网外部转发流量时,源 IP 实施补尾部 0 值及前缀扩展,目的 IP 进行地址映射.

6 实验及性能分析

定义 8. 压缩比.将普通报文中源/目的 IPv6 地址所占存储空间与压缩后 IPv6 地址相关存储空间的比例,定义为地址压缩比 $RA_{compress}$.

IACH 机制中,除了 8 b IPHC 格式的固定字段^[6],新增了 SAL 和 DAL 字段(共 8 b).当然,现有互联网中传统非压缩的 IPv6 地址存储占用固定长度,源、目的地址各 128 b,共 256 b.

IACH 机制主要面向非本地链路地址的通信,其压缩性能分析主要涉及以下传输场景:

1) CASE1(内外通信).物联网子网节点与物联网子网外部系统通信时,报文在物联网子网传输时的地址压缩分析.源为外部地址,目的为物联网子网内部地址;或是目的为外部地址,源为物联网子网内部地址.

2) CASE2(内部通信).物联网子网内部通信,源/目的均为内部地址.

首先,分析 CASE1 的地址压缩比.6LoWPAN 机制中必须存储上述 8 b 固定字段.另外,由于物联网子网可接受任意外部 IPv6 地址访问,无法利用上下文标识符进行压缩,须存储完整的 128 b 外部 IPv6 地址.同时,对于物联网子网内部 IPv6 全局地址,有 2 种可能:1)存储 128 b 地址信息;2)根据上下文标识省略 64 b 网络前缀信息,需要 8 b 的上下文索引值.所以,上述 2 种情况的地址压缩比分别为

$$1) 256/(128+128+8)=0.97;$$

$$2) 256/(128+64+8+8)=1.23.$$

令 2 种情况发生概率相同,则平均压缩比为 1.1.

IACH 机制中,假设与外部通信的物联网子网节点为 N_i ,则地址压缩最好情况发生在 N_i 向其父节点发送或 N_i 父节点向 N_i 发送时;最差情况发生在第 1 层节点和物联网子网根节点之间的报文传输时,此时需要存储节点 N_i 整个有效寻径地址位.例如,图 2 中节点 12 向外部系统发送报文,最好情况发生在节点 12 到节点 7 的传输,只需存储节点 12 的层次比特位 0xFF;最坏情况发生在节点 3 到节点 1 的传输,需存储节点 12 的有效寻径地址位 0x020101FF.

图 10 给出了 IACH 和 6LoWPAN 机制在内外通信时地址压缩比分析. IACH 地址压缩比最大为 8,最小为 3.55,且平均压缩比随着通信节点的层数增加而减小,但相对 6LoWPAN 却有明显的优势.

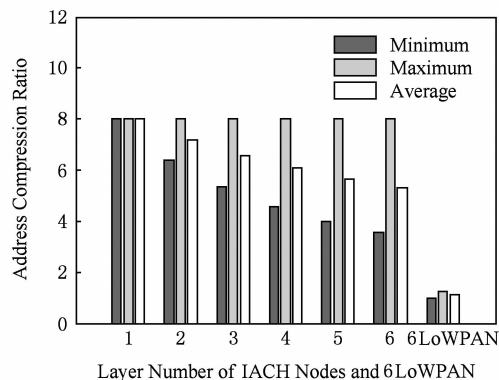


Fig. 10 Address compression ratio for communication between IoT nodes and external system.

图10 物联网子网节点与外部通信的地址压缩比

接着,分析 CASE2 的地址压缩比. 物联网内部通信时的地址压缩分析更为复杂,先给出关于最近公共祖先节点的定义.

令 N_i 和 N_j 是同一物联子网内任意 2 个不同的节点,定义 $NA(i, j)$ 为 N_i 和 N_j 的最近公共祖先节点,定义 $D_{A_i^{i,j}}$ 为 N_i 到 $NA(i, j)$ 的层数距离,定义 $D(i, j)$ 为 N_i 和 N_j 到最近公共祖先节点 $NA(i, j)$ 的距离和. 显然,有式(2)成立:

$$D(i, j) = D_{A_i^{i,j}} + D_{A_j^{i,j}}. \tag{2}$$

IACH 地址压缩机制的重要特点是:针对物联子网某节点,其地址在子树不同位置传输时,报文存储的比特位数各不相同,本文给出 IPv6 地址在压缩传输过程中的位数定义. 针对物联子网节点 N_i ,其 IPv6 地址作为源地址,在第 k 层节点向 $k-1$ 层节点(上行)传递报文中所占比特位数定义为 NU_i^k ;节点 N_i 的 IPv6 地址作为目的地址,在第 k 层节点向 $k+1$ 层节点(下行)传递报文中所占比特位数定义为 ND_i^k . 有式(3)成立:

$$NU_i^k = \sum_{j=k}^{N_i.lay} LB[j].n, \tag{3}$$
$$ND_i^k = \sum_{j=k+1}^{N_i.lay} LB[j].n,$$

其中, $0 < k \leq N_i.lay$.

报文上行传输时的目的 IPv6 地址及下行传输时的源 IPv6 地址都需存储对应节点的整个有效寻径地址位. 针对节点 N_i 的地址,其作为源地址出现在第 k 层向 $k-1$ 层传输的报文中的比特位数,与其作为目的地址出现在第 $k-1$ 层向第 k 层传输的报文中的比特位数相等. 当然,这 2 种情况存储 N_i 地址的具体内容也相同. 所以,有式(4)成立:

$$NU_i^k = ND_i^{k-1}. \tag{4}$$

不失一般性,针对图 11 计算物联子网内部通信时地址压缩比. N_i 上行传输时目的 IP 地址存储长度不变,一直为 N_j 的有效寻径地址位,即:

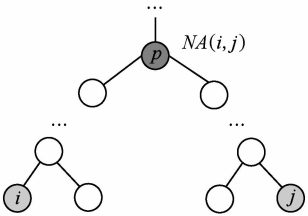
$$VAN(j) = \sum_{k=1}^{N_j.lay} LB[k].n. \tag{5}$$


Fig. 11 Communication topology inside IoT subnet.

图 11 物联子网内部通信拓扑图

上行传输经历 $D_{A_i^{i,j}}$ 次链路传输,有 $D_{A_i^{i,j}} = N_i.lay - N_p.lay$,由下往上不同层链路传输时源 IP 地址存储长度分别为

$$NU_i^{N_i.lay}, NU_i^{N_i.lay-1}, \dots, NU_i^{N_p.lay+1}.$$

继而,图 11 中 N_i 到 N_j 传输时,上行传输是 N_i 到 N_p ,源 IP 地址存储长度共为

$$\sum_{m=1}^{N_i.lay-N_p.lay} \sum_{k=N_i.lay-m+1}^{N_i.lay} LB[k].n = \sum_{m=1}^{D_{A_i^{i,j}}} \sum_{k=N_i.lay-m+1}^{N_i.lay} LB[k].n. \tag{6}$$

同理,分析 N_i 到 N_j 下行传输过程. 最终,可推导得到 IP 地址平均存储长度为

$$4 + 8 \times N_p.lay + (4 + 8 \times D_{A_i^{i,j}} \times D_{A_j^{i,j}}) / D(i, j). \tag{7}$$

所以,IACH 模型物联子网内部, N_i 和 N_j 通信中,源/目的 IP 地址平均存储长度与如下因素相关:

- 1) 最低公共祖先节点的层数 $N_p.lay$. 其它因素不变,其值越小,IP 地址平均存储长度越小.
- 2) N_i 和 N_j 到最近公共祖先节点的跳数距离和 $D(i, j)$. 其它因素不变,其值越小,IP 地址平均存储长度越小.
- 3) N_i 和 N_j 到最近公共祖先节点的跳数距离乘积 $D_{A_i^j} \times D_{A_j^i}$. 其它因素不变,其值越小,IP 地址平均存储长度越小.

基于表 1 所述真实节点进行实验,并将 IACH 与现有 6LoWPAN 进行比较分析.

Table 1 Parameters of IoT Nodes for Experiments

表 1 物联网实验节点参数

Parameter	Description
Processor	MCU8051, 32 MHz
Link Layer Protocol	IEEE 802.15.4
Transmission Rate/Kbps	250
Communication Distance/m	100
Memory	SRAM: 8KB, FLASH: 128 KB
Operating System	Contiki 2.6

实验拓扑如图 12 所示,物联子网层数为 6.

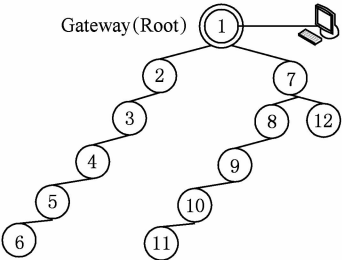


Fig. 12 Experiment topology.

图 12 实验拓扑图

1) 测试不同压缩机制下 IP 上层数据的最大负载长度. 由于物联网内部 IP 地址与其它 IP 地址在结构上具有明显的差异,实验分别针对 2 种场景进行:CASE1,物联网节点与外部互联网设备通信;CASE2,物联网内部节点间通信. 实验结果如表 2 所示,IEEE 802. 15. 4 链路层帧所能承载的最大字节数都是 125,而 IACH 机制在 2 种场景下都比原始 6LoWPAN 获得更大的 IP 上层数据负载长度,IACH 机制的最差情况也好于 6LoWPAN 最好情况.

Table 2 Max Payload of IP-upper Data in Different Compression Mechanism

表 2 不同压缩机制下 IP 上层数据的最大负载

Maximum Length of Upper Load of IP/B	6LoWPAN	IACH
Communication between IoT node and external terminal(the best)	69	89
Communication between IoT node and external terminal(the worst)	62	85
Communication between two IoT nodes (the best)	77	90
Communication between two IoT nodes (the worst)	62	81

2) 测试不同压缩机制的报文转发时延. 无论 6LoWPAN 或 IACH 压缩机制,报文中的链路层和 6LoWPAN 适配层长度都不固定,所以实验针对不

同的 IP 上层数据长度测量转发性能. 实验结果如图 13 所示,对于相同长度的 IP 上层负载,无论内外通信或内部通信,IACH 机制下的报文转发时延都略小于原有 6LoWPAN 机制. 图 13 中,转发时延的陡然升高是报文分片导致的,因为此时传输内容超过了最大 IP 上层负载. 所以,相对现有 6LoWPAN 机制,IACH 机制能在不增加转发时延的前提下,明显提升网络带宽利用率,起到绿色节能的功效.

7 总 结

IPv6 作为物联网节点的统一标识已得到广泛认可. 然而,128 b 的 IPv6 地址格式在存储、协议带宽等方面给物联网节点带来了不小的负担. 而且,物联网典型链路层控制协议 IEEE 802. 15. 4 所能承载的帧长度较小,这给 IPv6 头部压缩研究提出了很高的要求. 本文提出了新型地址压缩机制 IACH,通过地址压缩提升物联网报文传输的有效带宽比例. IACH 主要包括 3 种地址压缩技术:1)去除 IPv6 地址末尾的无效寻径信息,即尾部“0”值;2)下行传输时针对目的 IPv6 地址的地址剥离技术;3)上行传输时针对源 IPv6 地址的地址扩展技术. IACH 机制还面向物联网节点与子网外部互联网节点的通信提出了基于网关实施的虚拟地址映射机制,确保外部地址在物联网传输时的高效压缩存储. IACH 机制突破了现有 6LoWPAN 压缩范围的局限,大幅增加了数据包中 IP 上层数据的最大负载长度. 而且,IACH 机制基于 6LoWPAN 协议扩展实现,与 6LoWPAN 已有功能兼容. 基于真实节点的实验表明 IACH 转发处理时延略低于标准 6LoWPAN.

参 考 文 献

[1] Xie Kaibin, Chen Haiming, Cui Li. PMDA: A physical model driven software architecture for Internet of things [J]. Journal of Computer Research and Development, 2013, 50 (6): 1185-1197 (in Chinese)
(谢开斌,陈海明,崔莉. PMDA: 一种物理模型驱动的物联网软件体系结构[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(6): 1185-1197)

[2] Kim E, Kaspar D, Gomez C, et al. RFC 6606: Problem statement and requirements for IPv6 over low-power wireless personal area network (6LoWPAN) routing [S]. The Internet Society, 2012

[3] Winter T, Thubert P, Hui J, et al. RFC 6550: RPL: IPv6 routing protocol for low-power and lossy networks [S]. The Internet Society, 2012

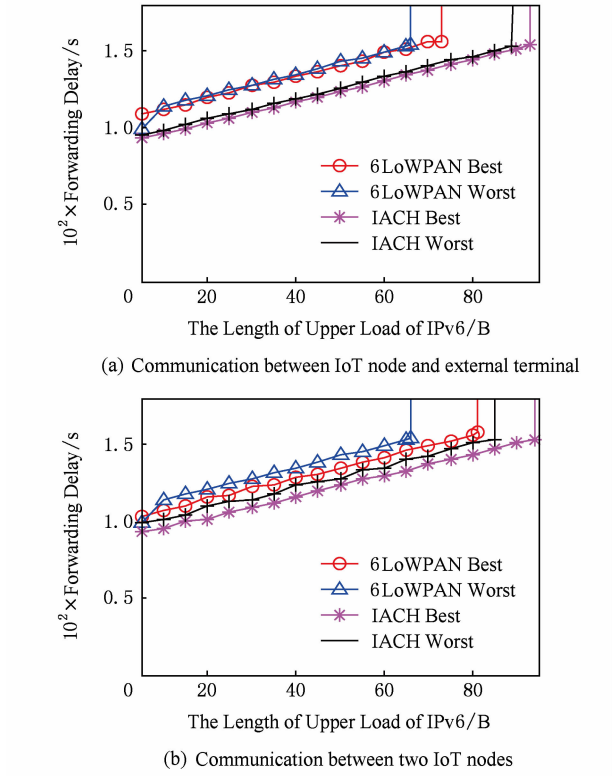


Fig. 13 Forwarding delay.

图 13 转发时延

[4] Dunkels A, Gronvall B, Voigt T. Contiki-a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors [C] // Proc of the 29th Annual IEEE Int Conf on Local Computer Networks (LCN'04). Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2004: 455-462

[5] Levis P, Madden S, Polastre J, et al. TinyOS: An operating system for sensor networks [G] //Ambient Intelligence. Berlin: Springer, 2005: 115-148

[6] Xiao Rong, Chen Wenlong, Sun Bo. Light weight and tree-based forwarding model in IPv6 IoT subnet [J]. Journal of Software, 2014, 25(8): 1729-1742 (in Chinese)
(肖融, 陈文龙, 孙波. 面向 IPv6 物联子网的轻量级树型转发模型[J]. 软件学报, 2014, 25(8): 1729-1742)

[7] Vasseur J P, Dunkels A. Interconnecting Smart Objects with IP-the Next Internet [M]. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 2010: 29-38

[8] Meyer D, Zhang L, Fall K. RFC 4984: Report from the IAB workshop on routing and addressing [S]. The Internet Society, 2007

[9] Deering S, Hinden R. RFC 2460: Internet protocol version 6 (IPv6) specification [S]. The Internet Society, 1998

[10] Gutierrez J A, Naeve M, Callaway E, et al. IEEE 802.15.4: A developing standard for low-power low-cost wireless personal area networks [J]. IEEE Network, 2001, 15(5): 12-19

[11] Pelletier G, Sandlund K. RFC 5225: Robust header compression version 2 (ROHCv2): Profiles for RTP, UDP, IP, ESP and UDP-Lite [S]. The Internet Society, 2008

[12] Montenegro G, Kushalnagar N, Hui J. RFC 4944: Transmission of IPv6 packets over IEEE 802.15.4 networks [S]. The Internet Society, 2007

[13] Hui J, Thubert P. RFC 6282: Compression format for IPv6 datagrams over IEEE 802.15.4-based networks [S]. The Internet Society, 2011

[14] Singh S, Singh M, Singh D. A survey of energy-efficient hierarchical cluster-based routing in wireless sensor networks [J]. International Journal of Advanced Networking and Application, 2010, 2(2): 570-580

[15] Shen Bo, Zhang Shiyong, Zhong Yiping. Cluster-based routing protocols for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2006, 17(7): 1588-1600 (in Chinese)
(沈波, 张世永, 钟亦平. 无线传感器网络分簇路由协议[J]. 软件学报, 2006, 17(7): 1588-1600)



Xiao Rong, born in 1974. Master, lecturer. Her research interests include Internet of things and Internet architecture.



Sun Bo, born in 1966. PhD, professor. His research interests include computer application technology.



Chen Wenlong, born in 1976. PhD, associate professor. His research interests include network protocol and network architecture.



Xiao Yongkang, born in 1974. PhD, associate professor. His research interests include computer network.



Wei Yungang, born in 1981. PhD, senior engineer. His research interests include computer network.