文章编号:1671－251X(2012)06－0043－05
张凯婷,徐钊,张峰,等.基于6LoWPAN的矿井无线传感器网络适配层研究[J].工矿自动化,2012(6):43-47.

基于6LoWPAN的矿井无线传感器网络适配层研究

张凯婷, 徐钊, 张峰, 杜娜

(中国矿业大学信电学院,江苏 徐州 221008)

摘要:针对采用6LoWPAN技术的矿井无线传感器网络WSN与Internet互联时,需要进行IEEE802.15.4与IPv6的协议适配转换的问题,提出了一种IPv4/IPv6适配层的设计方案。该方案采取分一总的设计思路:首先分别进行IPv4适配层和IPv6适配层的设计,然后通过分析这2个设计将IPv4适配层和IPv6适配层进行结合,使得IPv4适配层和IPv6适配层成为可选择使用的IPv4/IPv6适配层。文章还介绍了该方案在矿井人员定位系统网关中的应用。下一步的研究重点是研究可支持该方案实际使用的硬件。

关键词:矿井;人员定位;6LoWPAN;无线传感器网络;IP网络;IPv4适配层;IPv6适配层;协议适配转换

中图分类号:TD655.3　　文献标识码:A　　网络出版时间:2012－05－28 15:21

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20120528.1521.013.html

Research of Adaptation Layer of Mine WSN Based on 6LoWPAN

ZHANG Kai-ting, XU Zhao, ZHANG Feng, DU Na

(School of Information and Electrical Engineering of CUMT., Xuzhou 221008, China)

Abstract: In view of problem that it need make protocol conversion for adaptation between IEEE802.15.4 and IPv6 when interconnecting mine WSN with 6LoWPAN technology and Internet, the paper proposed a design scheme of IPv4/IPv6 adaptation layer. The scheme uses design idea of division and integration: firstly making design for IPv4 adaptation layer and IPv6 adaptation layer separately, then integrating IPv4 adaptation layer and IPv6 adaptation layer through analyzing the two designs to make IPv4 adaptation layer and IPv6 adaptation layer become optional IPv4/IPv6 adaptation layer. The paper also introduced application implementation of the scheme in gateway of mine personnel location system. The

收稿日期:2012－03－16

作者简介:张凯婷(1988－),女,山西晋中人,硕士研究生,主要研究方向为通信与信息系统。E-mail:zhangkaiting.1@163.com

Urbana-Champaign,2006.

[8] SUBRAMANIAN A P, BUDDHIKOT M M, MILLER S. Interference-aware Routing in Multi-radio Wireless Mesh Networks[C]// The 2nd IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks,2006.

[9] ZARHOUNI H, BENAINI R, HAJJI S E. Routing Constraint for VoIP Traffic in Wireless Mesh Networks[C]//International Conference on Multimedia Computing and Systems,2011.

[10] 陈娟.无线Mesh网络多路径路由协议的研究[D].合肥:合肥工业大学,2009.

[11] 刘锐.无线Mesh网络路由协议的研究与实现[D].武汉:武汉理工大学,2010.

[12] 杨飞.无线Mesh网络多信道MAC协议和路由协议研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.

[13] 张锋,顾伟.无线Mesh技术在煤矿井下应急通信系统中的应用[J].中国矿业,2010(11):106-108.

[14] 张德珍.基于网格型无线传感器网络的煤矿环境多参数监测系统的设计与实现[D].北京:北京交通大学,2008.

next research emphasis is to find corresponding hardware to support the scheme applied in practice.

Key words: mine, personnel location, 6LoWPAN, WSN, IP network, IPv4 adaptation layer, IPv6 adaptation layer, protocol conversion for adaptation

0 引言

近年来，国内外矿井安全监控系统广泛采用无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)技术[1-2]，就目前研究的基于 IEEE802.15.4 的矿井 WSN 而言，它要能和一个外部的网络连接在一起，使外部网络可以监测和控制 WSN 才具有更大的实用价值。6LoWPAN 技术能将传感节点获得的数据打包成 IP 数据包在 IP 网络上传输，使各种低功率设备加入 IP 网络大家庭中，与 WiFi、以太网以及其它类型的设备“称兄道弟”。6LoWPAN 技术使基于 IEEE802.15.4 的矿井 WSN 和 Internet 互联起来，有助于实现矿井 WSN 接入矿山 IP 网络，通过 Internet 来监测和控制 WSN；此外，也可以不用像 ZigBee 协议那样重新构建自己的网络层来满足特定的应用层[3-4]，更加符合矿山物联网发展的需求。

但是，支持 IPv6 的 Internet 仍处于实验网阶段，6LoWPAN 技术在网络层是与 IPv6 协议对应的，并不适用于目前大量使用的 IPv4。采用 6LoWPAN 的矿井 WSN 与 Internet 互联时，需要进行 IEEE802.15.4 与 IPv6 的协议适配转换，为了避免前期投资的浪费和适应发展的需要，参照 6LoWPAN 协议结构原理[5-7]，本文研究能够同时适配转换为 IPv4 或 IPv6 的协议，提出一种 IPv4/IPv6 适配层的设计方案，实现基于 IEEE802.15.4 的矿井 WSN 接入矿山 IP 网络。

1 矿井 WSN 接入矿山 IP 网络的方法

1.1 矿井 WSN 接入矿山 IP 网的问题分析

为实现矿井 WSN 接入承载 IPv4 数据报的矿山 IP 网络，需要考虑基于 IEEE802.15.4 的 WSN 如何接入基于 IPv4 的 Internet 的问题。解决的方法有 2 种：一种是使用传统的协议栈转换思想，首先按标准实现 6LoWPAN 与 IPv6 的适配对接，再进行 IPv4 和 IPv6 协议栈的转换；另一种则如本文所述，依据 6LoWPAN 协议结构原理，在 IEEE802.15.4 MAC 层的上面设计类似 IPv6 适配层的 IPv4 适配层，并将 2 种适配层合并，形成如图 1 所示的协议栈结构，即能够同时支持基于 IPv4 或 IPv6 的 TCP/IP 协议栈。

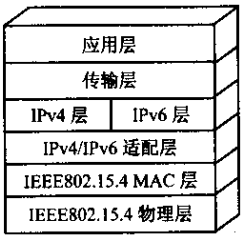


图 1 IPv4/IPv6 协议栈结构

1.2 设计方案

(1) 设计思路

本方案采取“分一总”的设计思路进行设计：首先分别进行 IPv4 适配层和 IPv6 适配层的设计，然后通过分析这 2 个设计将 IPv4 适配层和 IPv6 适配层进行结合，构建 IPv4/IPv6 适配层，实现在网络层可同时支持 IPv4 和 IPv6 的协议或者选择支持其中一种。

(2) 设计优点

① 简单，避免兼容。IPv4 协议和 IPv6 协议有很大的不同，同时设计的话很难使得设计同时满足 2 个协议的特点。

② 使用灵活，节省功耗。这样的“分一总”设计使得 IPv4/IPv6 适配层可以被分开分别使用。如果上层是 IPv4 网络层的话就可以关闭 IPv6 适配层的使用，节省这部分能量开销，同理如果上层是 IPv6 网络层就可以关闭 IPv4 适配层的使用来节省能量开销。

2 IPv4/IPv6 适配层的研究

通过分析、对比 IPv4 包头和 IPv6 包头[8]，发现 IPv4 包头中的总长度、生存时间、区分服务和协议字段在 IPv6 中分别被改作有效载荷长度、跳数限制、通信量类和下一个首部字段；IPv4 首部固定部分中的标识、分片、片偏移、首部检验以及可变部分，在 IPv6 包头中消失，改为了扩展包头功能；IPv6 中加入了一个新字段：流标号。因而，IPv4/IPv6 适配层的研究主要针对 IPv4 包头和 IPv6 包头各自的特点，进行包头压缩和分片、重装。

2.1 IPv4 适配层设计

IPv4 将分片字段包含在 IPv4 包头固定部分中，不同于 IPv6 包头通过扩展首部来进行数据包分片，因此，在 IPv4 适配层的结构设计中，就只考虑包头的压缩。并且 IPv4 包头固定部分只有 20 B，远

小于 IPv6 的 40 B，只要进行稍微的压缩就能使 IPv4 适配层架构在 IEEE802.15.4 链路层之上，并给上层协议留下比较富裕的传输数据字段。

在 IPv4 包头中，版本为固定数值，区分服务一直都未被使用过，用 1 bit 来标识。标志在原首部占 3 位，但标志字段的最低位是 MF（More Fragment），MF＝1 表示后面还有分片，MF＝0 表示最后一个分片；标志字段中间的一位是 DF（Don't Fragment），只有当 DF＝0 时才允许分片。所以这里只分配 2 bit 字段。源地址和目的地址可以通过 IEEE802.15.4 MAC 层的源地址和目的地址推断出，分别用 2 bit 来标识。IPv4 包头中的总长度字段是首部和数据之和的长度，数据长度可以由 IEEE802.15.4 PPDU 的“Frame Length”字段推断出，即数据长度＝ Frame Length－MAC 帧头长度和帧尾。此外，需要保留的有首部长度、协议、生存时间、片偏移、标识、首部校验和。这样，就把 20 B 的 IPv4 包头压缩为 9 B，其中保留位共 4 位。当传输报文不需要分片时，片偏移和标识可以忽略，这样 IPv4 包头便被压缩为 7 B。

对 IPv4 包头进行压缩（这里暂不考虑 IPv4 包头的可变部分），得到的 IPv4 包头压缩报文格式如表 1 所示。

表 1　IPv4 包头压缩报文格式

头部控制域(HC)	IPv4 精简报文(数据部分)
9/7 B	可变

表 1 中的头部控制域结构如图 2 所示，其编码中每个比特位的具体含义如下：

版本、区分服务：0 指没有压缩，还在原来的报文中存在，原来的 8 bit；1 指报文中不存在这 2 个字段，它们的默认值为版本＝4，区分服务＝0。

源地址：00 指没有压缩，即包头中的 32 位地址，10 指目的地址是 16 位短地址，01 和 11 预留。

目的地址：00 指没有压缩，即包头中的 32 位地址；10 指压缩地址，即 16 位短地址，01 和 11 预留。

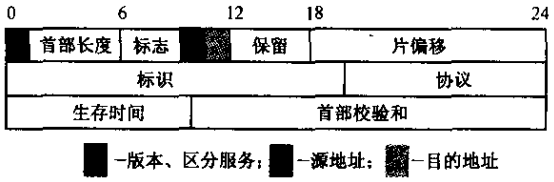


图 2　头部控制域结构

IEEE802.15.4 MAC 帧中的地址信息使用 PAN 标识码（2 B）和 16 位短地址与 IPv4 的 32 位地址对应[7]。

2.2　IPv6 适配层设计

2.2.1　报头压缩设计

在 6LoWAN 中，一些 IPv6 包头信息被认为是共用的，可以压缩为 HC1 头，包括 IPv6 版本号、IPv6 源地址和目的地址、IPv6 源和目的地址的接口标识（可以由 MAC 层源和目的地址推断出）、包长（可以由 IEEE802.15.4 PPDU 的“Frame Length”字段或分片头的“报文大小”字段推断出）、传输类别（为 0）、数据流标签（为 0）、下一个包头（为 UDP、ICMP 或 TCP）。在 IPv6 包头中，唯一需要完整保留的是“跳数限制”字段。由此，普通的 IPv6 包头最多可以被压缩为 2 B，即 1 B 的 HC1 编码、1 B 的跳数限制[8]。本方案引入了 HC1 头，如表 2 所示，在 HC1 头前是控制域标识 Dispatch 字段（1 B）[5]，在 HC1 头后是 IPv6 载荷。Dispatch 字段遵从 6LoWPAN 标准定义，用以控制报文是否需要被压缩。

表 2　IPv6 包头压缩报文格式

Dispatch	HC1 头	IPv6 载荷
1 B	2 B	可变

HC1 头定义了 IPv6 报文头部各个域的格式，如表 3 所示。

表 3　HC1 头编码格式

Version、Traffic Class、Flow Label	Next Header	S_Addr	D_Addr	RSV
1 bit	2 bit	2 bit	2 bit	2 bit

Version、Traffic Class、Flow Label：0 指这 3 个字段在报文中仍然存在，没有压缩；1 指报文中不存在这 3 个字段，它们的默认值为 Version＝6，Traffic Class＝0，Flow Label＝0。

Next Header：00 指没有压缩，即在 Payload 中存在 Next Header 域；01 指在 Payload 中不存在 Next Header 域，并且 IPv6 载荷是 ICMPv6 报文；10 指在 Payload 中不存在 Next Header 域，并且 IPv6 载荷是 UDPv6 报文；11 预留（因为 WSN 一般不实现 TCP）。

S_Addr：00 指源地址没有被压缩，长度为 128 bit；01 预留，10 指源地址是 16 位短地址，11 指源地址是 64 位扩展地址。

D_Addr：00 指目的地址没有被压缩，长度为 128 bit；01 预留，10 指目的地址是 16 位短地址，11 指目的地址是 64 位扩展地址。

2.2.2 分片设计

在 6LoWPAN 中，由于 IPv6 数据包支持的最小值(1 280 B)大于 IEEE802.15.4 帧所能包含的字节数(127 B)，因此，在 WSN 中传输一个完整的 IPv6 数据包时，必须对其进行分片处理。本设计将 IPv6 分片信息放在 IPv6 适配层的设计之中。设计了 2 种适配层头部：不分片报文头部与分片报文头部，其中，分片报文头部中又分为第一片报文头部与后继报文头部[9]。

(1) 不分片报文头部格式如表 4 所示。

表 4 不分片报文头部格式

分片类型	链路分片	保留	负载
1 bit	2 bit	5 bit	IPv6 数据包

分片类型指出 Payload 中 IPv6 头部是否为压缩类型，0 表示未压缩的 IPv6 头部，1 表示压缩的 IPv6 头部；链路分片：00 表示不分片，01 表示第一片，10 表示中间分片，11 表示最后一片，此处为 00；保留位全部设置为 0；负载部分的内容为 IPv6 数据包。为了节省空间，适配层不设置地址字段，它可以通过硬件抽象层从帧头部获取地址信息。

(2) 分片报文头部格式的第一片报文头部格式如表 5 所示。

表 5 分片报文的第一片报文头部格式

分片类型	链路分片	标识	负载
1 bit	2 bit	13 bit	IPv6 数据包

此处链路分片为 01；标识用来唯一标识一个被分片的 IPv6 数据包，该值在同一个 IPv6 数据包的每个分片中的值都相同。

分片报文头部格式的后继报文头部格式如表 6 所示。

表 6 分片报文的后继报文头部格式

分片类型	链路分片	标识	分片偏移量	负载
1 bit	2 bit	13 bit	8 bit	IPv6 数据包

此处链路分片为 10 或 11；分片偏移量指出分片报文偏移原始数据包开始处的位置，偏移的字节数是此字段值乘以 8。

2.3 IPv4/IPv6 适配层的设计

从上面的设计可发现 IPv4 包头压缩和 IPv6 包头压缩后，在控制域部分都有保留位存在。这个保留位的存在就可以作为 IPv4 适配层和 IPv6 适配层的结合点，用 1 bit 来控制 IPv4 适配层和 IPv6 适配层的使用。具体使用细节叙述如下：

(1) IPv4 保留位的最后一位为 1 时(其它 2 位设为 0)，表示使用 IPv4 适配层；最后一位为 0 时，表示不使用 IPv4 适配层。

(2) IPv6 保留位为 1 时，表示使用 IPv6 适配层；保留位为 0 时，表示不使用 IPv6 适配层。

3 IPv4/IPv6 适配层的应用

当前研究的矿井人员定位系统中，采用的就是基于 IEEE802.15.4 的 WSN，WSN 节点附着在每个人员的身上，对其所处的地理位置进行定位、标识。根据上述设计方案设计一个网关，让 Internet 能够监测和控制该 WSN 中的每个节点，这样，井下每个人的详细信息和状况便能与井上的 Internet 客户端进行交互，更好地保证井下工作人员的安全。

3.1 网关设计

WSN 接入 IP 网络的核心内容是利用网关屏蔽下层网络，向远端用户提供信息服务。网关在人员定位系统网络中的作用如图 3 所示。

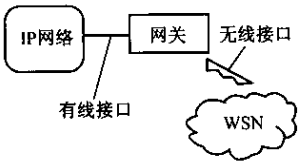


图 3 网关在人员定位系统网络中的作用

图 3 中，网关由网络接口层、IPv6 分片适配层和 IPv4/IPv6 适配层 3 个部分组成。其中网络接口层包括 WSN 接入网关的无线网络接口层和以太网接入网关的有线网络接口层[10]。具体网关结构框架如图 4 所示。

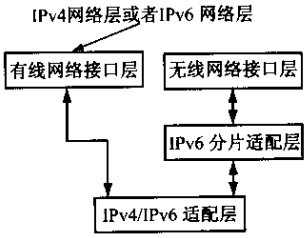


图 4 网关结构框架

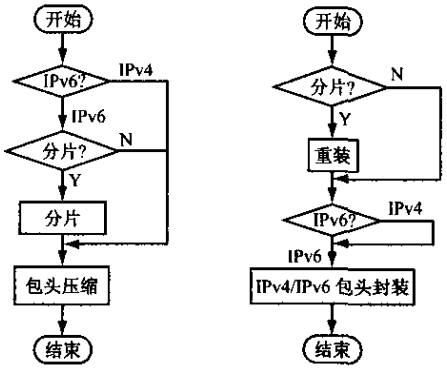
(1) 网络接口层：用于发送和接收数据、IP 数据帧与 IEEE802.15.4 数据帧之间的转换。

(2) IPv6 分片适配层：实现 IPv6 数据包分片以及分片重组等功能(只有在 IPv4/IPv6 适配层作 IPv6 适配层的情况下使用)。

(3) IPv4/IPv6 适配层：实现 IPv4 头部或者 IPv6 头部的精简以及 IPv4 头部和 IPv6 头部的还原。

3.2 网关工作流程

网关工作流程如图 5 所示。



(a) IP 网络向 WSN 传输数据流程　　(b) WSN 向 IP 网络传输数据流程

图 5　网关工作流程

图 5(a)说明：首先从有线网络接口层采集数据包，判断是 IPv4 报文还是 IPv6 报文，如果是 IPv4 报文的话就直接进入 IPv4/IPv6 适配层包头压缩环节，形成 IPv4 报文压缩格式，如果是 IPv6 报文就进入分片判断环节，判断 IPv6 报文需不需要分片。如果需要分片，就进入 IPv6 分片适配层进行分片，然后进行报头压缩，形成 IPv6 报文压缩格式，如果不需要就直接进入 IPv4/IPv6 适配层进行包头压缩环节，形成 IPv6 报文压缩格式。

图 5(b)说明：首先从 WSN 采集数据，判断所采集的数据是否为分片数据，如果是分片数据进行重装，然后进行是否为 IPv6 数据报的判断，如果不是分片数据直接再进行是否为 IPv6 数据报的判断。经判断，如果是 IPv6 数据包就用 IPv6 帧头进行封装，形成完整的 IPv6 数据报，供上层使用，如果是 IPv4 数据包就用 IPv4 帧头进行封装，形成完整的 IPv4 数据报，供上层使用。

4 结语

要使 6LoWPAN 得到更加快速的发展和应用，就需要解决适配层可支持 IPv4 协议的问题。介绍的全新的、适合于广泛使用 IPv4 协议的 IPv4/IPv6 适配层设计方案，可同时支持 IPv4 和 IPv6 的协议标准，并且适合应用到矿井人员定位系统中的 WSN 接入矿山 IP 网络的网关设计中，使得该方案具有一定的使用价值。从发展的角度看，相对 IPv4 有限的地址空间，IPv6 的地址空间更加满足矿井人员定位系统的需求，而且基于 IPv6 的 Internet 也是网络发展的必然，因此，IPv4/IPv6 适配层的研究不仅符合当下的应用需求，同样适用于未来的发展需求。下一步的重点是研究具体可支持该方案实际使用的硬件。

参考文献：

[1] 孙继平. 煤矿井下人员位置监测技术与系统[J]. 煤炭科学技术，2010，38(11)：1-5.

[2] 岳秋艳，王文学，郭霞. 基于无线传感器网络的煤矿井下人员定位系统设计与实现[J]. 电脑知识与技术，2011(15)：247-248.

[3] 瞿雷，刘德胜，胡咸斌. ZigBee 技术及应用[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2007.

[4] 杨雪峰. 基于 ZigBee 无线传感网络定位技术研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2008.

[5] KUSHALNAGAR N, MONTENEGRO G, SCHUMACHER C. IPv6 overflow-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals[EB/OL]. (2007－08－06)[2012－01－17]. http://wenku.baidu.com/view/8aae2e707fd5360cba1adb14.html.

[6] MONTENEGRO G, KUSHALNAGAR N, HUI J, et al. RFC 4944. Transmission of IPv6 Packets over IEEE802.15.4 Networks[EB/OL]. (2007－09－10)[2012－01－17]. http://wenku.baidu.com/view/b784cdeb551810a6f5248689.html.

[7] SHELBY Z, BORMANN C. 6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet[M]. USA: John Wiley & Sons Inc., 2010.

[8] 谢希仁. 计算机网络[M]. 北京：电子工业出版社，2007.

[9] 王晓喃，高德民. 6LoWPAN 传感器节点的设计与实现[J]. 传感技术学报，2010(3)：1501-1504.

[10] 王晓喃，钱焕延，唐振民. 6LoWPAN 网关的设计与实现[J]. 传感技术学报，2009(5)：717-721.