

# 基于 VPN 的车载网关异构无线网络切换系统

曲良东<sup>1,2</sup>, 刘衍珩<sup>1,2</sup>, 魏 达<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学 计算机科学与技术学院, 长春 130012; 2. 吉林大学 符号计算与知识工程教育部重点实验室  
长春 130012)

**摘要:**设计和实现了在嵌入式 Linux 车载网关中基于 VPN(Virtual private network)的异构无线网络切换系统。车载网关中使用支持 802.11 协议的无线网卡连接无线局域网和支持 CDMA 的无线通信模块来连接无线广域网, 软件上采用虚拟网络接口来实现上层应用程序通信与底层协议的无关性, 从而实现了这种异构无线网络的无缝衔接, 提高了网络利用效率。实验结果表明, 该系统简单有效, 适用于低能耗、低运算能力的车载系统中。

**关键词:**计算机系统结构; 嵌入式 Linux; 车载网关; 垂直切换; 虚拟专用网络

**中图分类号:**TP393    **文献标志码:**A    **文章编号:**1671-5497(2010)05-1292-06

## System of vertical handoff for heterogeneous wireless network based on VPN on in-vehicle gateway

QU Liang-dong<sup>1,2</sup>, LIU Yan-heng<sup>1,2</sup>, WEI Da<sup>1,2</sup>

(1. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China; 2. Key Laboratory of  
Symbolic Computation and Knowledge Engineering of Ministry of Education, Jinlin University, Changchun 130012,  
China)

**Abstract:** A system of vertical handoff for heterogeneous wireless network based on (Virtual Private Network (VPN) on in-vehicle gateway was designed and implemented. It provides a Wireless Local Area Network (WLAN) card, which supports 802.11 protocol on the in-vehicle gateway, and a Code Division Multiple Access (CDMA) wireless communication module to support both WLAN and Wireless Wide Area Network (WWAN). A virtual network interface was implemented to achieve the independence between the application level program communication and low-level protocol, so that it can realize seamless connection of the heterogeneous wireless networks. Experiment results show that this in-vehicle gateway system can be widely applied in in-vehicle system with low power consumption and low operational ability.

**Key words:** computer systems organization; embedded Linux; in-vehicle gateway; vertical handoff;  
VPN

收稿日期: 2009-11-14.

基金项目: 国家科技部国际合作与交流专项项目(2008DFA12140); 国家发改委下一代互联网业务试商用及设备产业化专项项目(CNGI-09-01-11); 国家自然科学基金项目(60973136).

作者简介: 曲良东(1980-), 男, 博士研究生. 研究方向: 移动通信, 协议分析. E-mail: qld001a@163.com

通信作者: 刘衍珩(1958-), 男, 教授, 博士生导师. 研究方向: 计算机通信与网络, 移动 IP, 网络服务质量.

E-mail: lyh\_lb\_lk@yahoo.com.cn

嵌入式 Linux 系统的提出和发展为嵌入式系统的应用提供了低成本、高性能的软件系统支持, 而虚拟设备和模块化动态加载是嵌入式系统的特性之一, 利用这一特性可以在车载网关中实现异构网络间的通信和切换。切换是移动通信系统中非常重要的功能之一, 移动终端在同构网络中的各小区间的切换称为水平切换<sup>[1]</sup>; 而移动终端在异构无线网络之间的切换则称为垂直切换。垂直切换是移动终端能够在异构无线网络系统间工作的特定功能要求, 它需要移动终端具备对目标异构无线网络的双模支持能力。异构无线网络中的垂直切换过程可分为网络发现、切换判决和切换执行 3 个阶段<sup>[2]</sup>。目前, 针对无线局域网和无线广域网两种网络的无缝切换, 已有一些改善性能的切换机制的研究, 例如基于模糊推理的方法<sup>[3]</sup>、基于策略的方法<sup>[4]</sup>、基于神经网络的方法<sup>[5]</sup>等, 但这些方法运算复杂, 在运算能力有限的车载网关中显然并不合适。同时这些算法和策略都是基于 NS2<sup>[1]</sup>等软件环境的模拟测试, 缺少整体的系统支持, 并没有进行实际的数据测量实验, 可行性较差。在这些方法中并没有考虑安全性, 对于车载系统来说, 对安全性有较高的需求。

VPN 技术是比较容易实现的安全接入方式之一, 它可以支持跨地域的安全连接, 将 VPN 技术应用于车载网关的网络切换中可以有效地解决切换的安全问题, 而在基于 Linux 系统的车载网关中使用虚拟网络设备<sup>[6]</sup>可以方便地实现 VPN 功能。因此, 本文在嵌入式 Linux 和 VPN 技术的基础上设计并实现了一种垂直切换方案, 既能进行垂直切换, 又能在进行切换时进行加密数据, 以保证数据的传输始终是安全的, 并且进行了实际测量。

## 1 系统的体系结构

根据实际网络使用状况, 将 CDMA 和 WLAN 作为异构无线网络的两种典型接入方式应用于文献[7]所述的车载网关上, 其系统网络架构如图 1 所示。

车载网关作为移动终端接入 CDMA 或者 WLAN, 其数据链路层和 TCP/IP 协议栈之间增加了一个虚拟网络接口层, 虚拟网络接口可以接收所有从 CDMA 和 WLAN 接口收到的数据, 并将其按照需要选择路由和传递给上层应用。同时将虚拟网络接口层设置为 VPN 通道的接口, 所

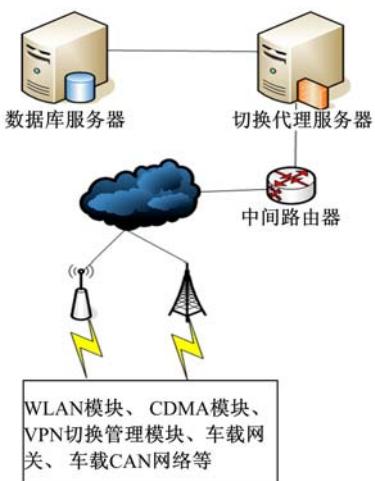


图 1 系统体系结构

Fig. 1 Architecture of system

有的上层应用数据都通过该虚拟网络接口发送数据, 即所有的数据传输都是针对虚拟接口的, 从应用上屏蔽了异构无线网络间的差异, 这样就保证了数据在异构无线网络中能够有效地传输。切换代理是与移动终端相对应的 VPN 网络的对端, 它将接入的 VPN 子网经过安全处理后转发到另一个安全子网内的主机站点。由于主机站点处于切换代理的网络子网内, 对于外网主机站点是不可见的, 这样也就保证了除 VPN 网内节点外其他外部连接无法访问到主机站点, 保证了主机站点的安全性。

## 2 车载网关的垂直切换技术实现

整个车载网关的 VPN 异构无线网络切换系统主要包括具备异构无线网络接口的车载网关和切换代理服务器 2 个部分。

### 2.1 车载网关硬件平台的组成

具备异构无线网络接口的车载网关的硬件系统结构如图 2 所示。

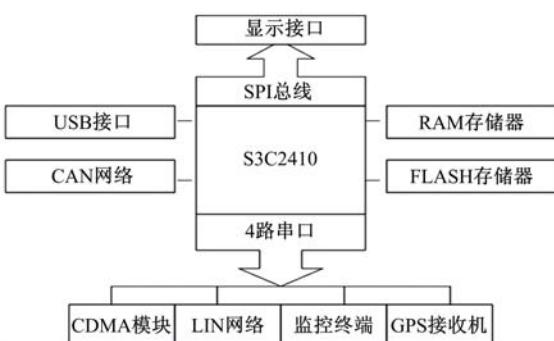


图 2 硬件平台组成

Fig. 2 Component of hardware platform

以 S3C2410 为核心构建车载网关的硬件平台,具备 4 路串口、USB 接口等外围接口。为了能够同时接入两种异构无线网络,车载网关中设置了 WLAN 接口和 CDMA 接口。网关中 WLAN 网卡占用的是一个 USB 接口,而 CDMA 则占用 1 个串口,从而构成了一个支持异构无线网络的双模车载网关。

## 2.2 虚拟网络接口模块

虚拟网络接口作为网络切换的关键模块处于硬件驱动层和 TCP/IP 协议栈之间。在接收过程中,虚拟网络接口将从驱动中接收到的数据包截获,然后进行安全分析和解密,并将 IP 地址重新指向虚地址,这样对于应用层程序来说,只需要针对虚拟地址进行网络程序的设计,而不需要了解异构无线网络间的差异,从而提高了应用程序的设计效率和可维护性。另一方面,通过虚拟网络接口实现的 VPN 也在安全性上为汽车应用提供了有效的保证。在发送过程中,虚拟网络接口起到数据重封装和收发接口选择的作用,这也就是异构无线网络切换的作用,当存在更有利于数据传输的接口时,虚拟网络接口可以自动地选择合适的接口进行数据传输。这一过程对于应用层程序来说是透明的。在车载网关中,VPN 是通过虚拟网络接口来实现的。

VPN 的实现有多种方式,如 IPsec 等<sup>[8]</sup>,但是使用 IPsec 无法与网络切换结合起来,因此利用 Linux 操作系统的特性实现使用虚拟网络接口模块来完成 VPN。因为车载网关的软件系统使用的是嵌入式的 ARM-Linux 操作系统,所以在模块的实现上比在其他的嵌入式系统更加容易,并且支持动态的加载和卸载,对于将来模块的升级有极大的好处。

在模块的实现中需要使用到 sk\_buff 数据结构,它是 Linux 系统中的一个非常重要的网络控制结构,在 Linux 系统中所有的网络传输功能都是基于该结构体来完成的。其中包含的 3 个 union 结构依次是传输层、网络层和链路层的头部结构指针,通过这些指针就能够找到相关的网络层数据包,并根据需要修改其内容,或者进行加密,从而实现 VPN 中的 IP 地址的重新定位和安全加密功能。

```
union
{
    struct tcphdr * th;
```

```
    struct udphdr * uh;
    struct icmphdr * icmph;
    struct igmphdr * igmph;
    struct iphdr * ipiph;
    struct spxhdr * spxh;
    unsigned char * raw;
} h;
union
{
    struct iphdr * iph;
    struct ipv6hdr * ipv6h;
    struct arphdr * arph;
    struct ipxhdr * ipxh;
    unsigned char * raw;
} nh;
union
{
    struct ethhdr * ethernet;
    unsigned char * raw;
} mac;
```

虚拟网络接口模块的作用如图 3 所示。模块注册后会在系统中驻留,并监视网络数据流,在 IP 层数据和传输层数据之间截获数据,然后进行分析和处理,进行相应的地址重定位和安全加密。

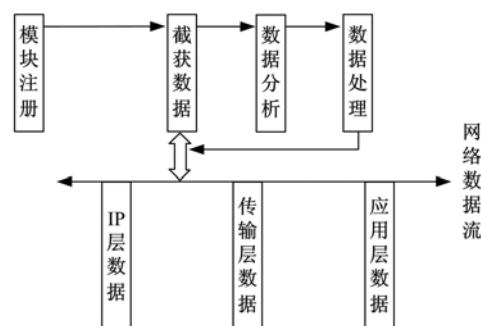


图 3 虚拟网络接口模块的作用

Fig. 3 Function of virtual network interface

## 2.3 切换方法

整个切换过程可以分为网络发现、切换判决和切换执行。网络发现是指在移动主机移动过程中扫描到符合网络接入条件的目标网络,切换判决是指在发现目标网络后判断该目标网络是否能够符合数据传输要求,切换执行则是在判断能够进行切换之后进行地址切换的过程。

网络发现是通过使用 WLAN 或者 CDMA 的链路扫描基站来完成的,主要是以 WLAN 的

信号强度为依据,因为在大多数情况下,汽车都可以处于CDMA的信号覆盖范围内。因此,其先决条件是能够接入WLAN,否则就使用CDMA,或者从即将无效的WLAN中切换回CDMA。

切换判决是通过测定一个稳定的无线网络信号强度来作为切换的阈值,无线网络的信号强度可以通过无线网卡在扫描接入点时获取,一旦发现接入点,无线网卡要不停地扫描其信号强度,当信号强度满足切换的阈值时进行切换。

现有的垂直切换算法对切换阈值的判断运算复杂,CPU时间消耗大,因此本文采用一种较为简单的切换策略来确定切换的接收信号强度(Receive signal strength,RSS)作为切换的阈值,此处仅考虑CDMA向WLAN切换,设该阈值为 $RD_w$ 。

当车载网关移动到某一个可接入的AP范围内时,会主动请求分配一个IP地址,记录此时的RSS为 $RD_1$ ,虽然车载网关能够接入AP,但是不代表此时的车载网关切换的效果可以接受,应同时取一个比较大的RSS值作为初始的切换阈值设为 $RD_0$ ,并设切换丢包个数为 $N_p$ ,切换延迟为 $T_p$ ,则在区间 $[RD_1, RD_0]$ 存在一个 $RD_K$ ,使得当 $RD_w = RD_K$ 时, $N_p \leq a$ ,且 $T_p \leq p_a$ ,其中 $a$ 为设定的可接受的丢包个数最小值, $p_a$ 为设定的允许的切换延迟。由实际问题可知, $RD_i$ 为一系列的离散点,因此可以转化为求

$$RD_w = \text{Min}\{RD_i, | RD_i \in F(RD_i, N_p, T_p) \} \quad (1)$$

式中: $RD_i$ 为区间 $[RD_1, RD_0]$ 中的某一个值; $F(RD_i, N_p, T_p)$ 表示由 $RD_i$ 为阈值时切换的丢包个数与切换延迟的记录集合。

根据黄金分割法确定满足式(1)的 $RD_i$ ,过程如下:

- (1)确定搜索区间 $[RD_1, RD_0]$ 和允许的接收信号变化误差 $RD_{\min}$ 。
- (2)计算 $RD_2 = RD_0 - \lambda(RD_0 - RD_1)$ ,记录 $F(RD_2, N_p, T_p)$ 的各个值( $\lambda$ 取0.618)。
- (3)计算 $RD_3 = RD_0 + RD_1 - RD_2$ ,记录 $F(RD_3, N_p, T_p)$ 的各个值。
- (4)若 $| RD_2 - RD_3 | < RD_{\min}$ ,则得切换时的阈值 $RD_w = (RD_2 + RD_3)/2$ ;否则转步骤(5)。
- (5)若 $F(RD_2, N_p, T_p)$ 中的 $N_p$ 和 $T_p$ 指标大于 $F(RD_3, N_p, T_p)$ ,则令 $RD_0 = RD_3$ , $RD_3 = RD_2$ ,并将 $F(RD_3, N_p, T_p)$ 中的各个值用

$F(RD_2, N_p, T_p)$ 的各个值替换,重新计算 $RD_2 = RD_0 - \lambda(RD_0 - RD_1)$ ,记录 $F(RD_2, N_p, T_p)$ 的各个值,转步骤(4);否则令 $RD_1 = RD_2$ , $RD_2 = RD_3$ ,并记录 $F(RD_2, N_p, T_p)$ 的各个值,转步骤(3)。

除了开始计算的 $RD_2$ 和 $RD_3$ 以外,每一步只需记录一次数据,计算量很小,而且可以证明黄金分割法具有超线性的收敛速度,可以很快地找到符合条件的切换阈值 $RD_w$ 。

切换执行是当满足切换条件时,车载网关向切换代理进行IP地址的注册并获取注册确认,完成数据通道的变换,这个过程中有一定的数据延迟和数据包丢失,因此需要做一定的数据缓冲用来保证尽可能低的丢包率。整体切换过程如图4所示。移动节点发现新的接入点之后通过DHCP协议获取新的IP地址,然后向代理注册,切换代理进行确认之后,移动节点将数据发送的通道切换到新的接入点上,完成切换过程。

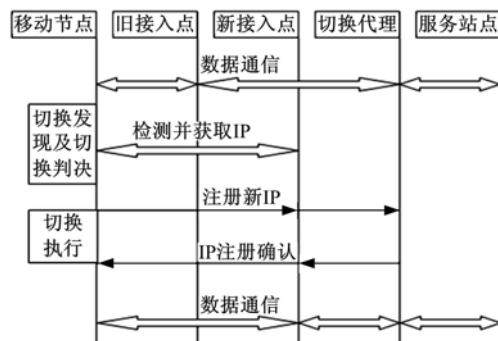


图4 切换过程

Fig. 4 Process of handoff

切换代理起到为切换IP注册和VPN服务器端的作用,当车载终端每一次网络切换时需要向切换代理进行注册,而后才能执行切换,从而保证每次切换后车载网关与远程服务器站点间的连接不断开。

切换代理中也需要加载一个虚拟网络接口模块,该虚拟网络接口模块负责监听代理端的物理网卡的所有数据,然后分析该数据是否为车载网关发送来的VPN数据。如果是,则将该数据分析解密并重新进行IP定位转发到相应的远程服务器端;否则送入协议栈等待路由。当远程服务器端的数据需要发往车载网关时,切换代理将数据加密后在虚拟网络接口模块中进行重新封装,将数据封装成车载网关可识别的VPN数据,然后选择连接的IP地址发送出去。

切换代理的程序使用 C 语言编写,分应用层转发和 IP 层转发。切换代理的应用层程序使用的是 Socket 编程实现的 UDP 服务器端,并使用 Rawsocket<sup>[9-10]</sup>来完成上层应用的数据传递。

切换代理中的 IP 层转发是由虚拟网络接口模块完成的,它与车载网关的虚拟网络接口模块相对应,具有相同的程序结构和数据结构,同时在逻辑上也是处于 IP 层和传输层之间,负责将截获的数据包进行分析和处理,在并发数据传递时通过端口和地址的映射来完成切换之后的地址重定位,从而完成 VPN 对端的数据收发功能。

### 3 实验测试

使用一台捷达轿车作为实验车,并对其进行改装,在车载网关中使用 Ralink 的 RT73 系列无线网卡,CDMA 使用 FD-810CDMA 模块组成双模异构无线网络连接模式。AP 使用的是华硕的 WL-520GC,AP 型号不同,其信号范围、信号稳定性等都不同,使用 2.3 节中所述的切换方法进行测定,在信号强度为 25 dB 时可以稳定地接入该 AP,并且具有较为理想的切换效果,因此在实验时使用的切换阈值为 25 dB。

实验时汽车行驶路线图如图 5 所示,所有区域内均为 CDMA 覆盖范围,虚线圆圈内为 AP 的覆盖范围,箭头为汽车行驶方向。切换代理使用 PC 机,使用 C 语言开发,操作系统为 Linux,内核版本 2.4.20,为了方便观察,设置了数据库服务器和监控终端。数据库服务器采用 SQLSERVER2005,服务器程序为自主研发,操作系统使用 WINXP+SP2,监控终端使用 Visual Studio 2005 开发,运行环境为 WINXP+SP2。切换性能测试结果如表 1 所示。

对不同车速下的丢包率和切换延迟进行测试,每一圈可以测试 2 次,分别是从 CDMA 切换

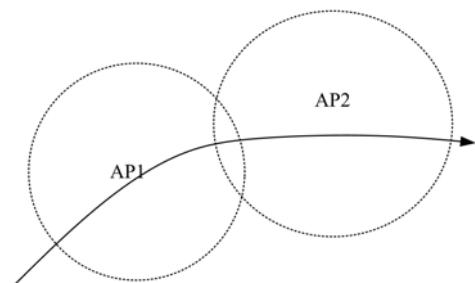


图 5 测试汽车行驶路线图

Fig. 5 Route map of testing car

表 1 测试结果

Table 1 Results of test

车速 (km·h <sup>-1</sup> )	10	20	30	40	50
C-W 切换延迟 /ms	138	141	149	151	182
丢包率 (个/组)	0	0	0	1	1
W-C 切换延迟 /ms	1121	1153	1277	1783	1632
丢包率 (个/组)	1	0	0	2	3

到 WLAN 和从 WLAN 切换到 CDMA,每 10 圈 20 次切换为一组,计算不同速度下的平均丢包率和切换延迟,使用流数据进行测试,因为实际测量时车速不可能完全保持一致,因此只取切换时间段的汽车平均速度作为车速参考值。从表 1 中可以看出,随着车速的增加,切换延迟和丢包率都有所增加,而且从 WLAN 到 CDMA 的切换延迟比较长。对比 2 个切换过程可知,CDMA 的切换延迟偏大与 CDMA 的链路质量有直接关系,所以必须在切换执行中进行数据缓冲,从而保证比较低的丢包率。

安全性能的测试比较简单,设计两种测试如下:

(1) 使用 VPN 地址以外的主机访问车载网关中的应用服务。经过测试可以获知该请求被拒绝,VPN 外部的主机无法访问车载网关中的应用服务。

(2) 使用网络抓包工具分析抓获的数据,对比分析物理网卡和虚拟网卡中的数据包。经过测试可知,经过加解密前后的数据包是完全不同的。加密前数据包是明文,可以使用网络抓包工具捕获 IP 报文,看到其内容;在加密之后,虽然网络抓包工具依然能够捕获 IP 报文,但无法解析其内容,从而验证了数据的加密性和安全性。

### 4 结束语

在 VPN 技术和嵌入式 Linux 的基础上设计和实现了车载网关异构无线网络的切换系统,使用基于 ARM920T 的硬件平台和 ARM-Linux 的软件平台组成网关的基本运行平台,通过虚拟网络设备实现了 CDMA 和 WLAN 的双模支持系统,并实现了 VPN。在通讯过程中通过异构无线

网络的自动切换使得车载网关可以获得更好的网络利用效率和更多的网络资源服务。该车载网关已经通过验收,整个系统在运行过程中表现良好,具有较高的稳定性。在后续研发中,随着车载系统的进一步发展还可以继续探索更好的切换策略和算法,使车载网关不仅可以作为汽车网络与互联网的沟通桥梁,还可以使汽车发展成为互联网的中继节点,进一步拓展汽车在互联网中的应用,扩大汽车电子的应用范围。

#### 参考文献:

- [1] 刘敏,李忠诚,徐刚,等.异构无线网络中的垂直切换仿真评价模型及评价指标[J].系统仿真学报,2007,19(2):277-281.  
Liu Min, Li Zhong-cheng, Xu Gang, et al. Performance evaluation models and metrics for vertical handoff algorithms in heterogeneous wireless networks[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19 (2): 277-281.
- [2] Stevens-Navarro E, Wong V W S. Comparison between vertical handoff decision algorithms for heterogeneous wireless networks[C]// Proceedings of the 63rd IEEE Vehicular Technology Conference, Melbourne, Australia, 2006.
- [3] Guo Qiang, Zhu Jie, Xu Xiang-hua. An adaptive multi-criteria vertical handoff decision algorithm for radio heterogeneous network[C]// IEEE International Conference on Communications, Seoul, Korea, 2005.
- [4] Fang Zhu, McNair J. Optimizations for vertical handoff decision algorithms [C] // IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Atlanta, USA, 2004.
- [5] Pahlavan K, Krishnamurthy P, Hatami A. Handoff in hybrid mobile data networks[J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(2):34-47.
- [6] 李云飞,姜晓峰.基于构件技术的虚拟仪器的研究与实现[J].仪器仪表学报,2006,27(11):1550-1553.  
Li Yun-fei, Jiang Xiao-feng. Research and implementation of virtual instrument based on CBSE[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27 (11):1550-1553.
- [7] 曲良东,刘衍珩,魏达,等.由车载网关实现车载信息与互联网的通信[J].仪器仪表学报,2008,29 (11):2330-2334.  
Qu Liang-dong, Liu Yan-heng, Wei Da, et al. Realization of communication between in-vehicle information and internet based on in-vehicle gateway[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29 (11):2330-2334.
- [8] 吴越,疏朝明,卜勇华,等.虚拟专用网络安全通信机制的研究与实现[J].通信学报,2003,24(8):168-176.  
Wu Yue, Shu Chao-ming, Bu Yong-hua, et al. Research & implementation of security communication mechanism for virtual private network[J]. Journal of China Institute of Communications, 2003, 24(8): 168-176.
- [9] Network Working Group W. Stevens. RFC-2292 Advanced sockets API for IPv6[S].
- [10] Network Working Group W. Stevens. RFC-3542. Advanced sockets application program Interface (API) for IPv6[S].