

# 列车控制无线通信电路域与分组域分配方法分析与设计

刘振玉, 宋岩, 屈永正

(湖南中车时代通信信号有限公司北京分公司, 北京 100079)

**摘要:** 欧洲列车运行控制系统 (ETCS) 体系规范基线 3 (3.6.0) 版本的 Subset037: Euro Radio FIS 引入了车地分组域通信的概念, 列车控制无线通信对分组域的支持势在必行。文章在总结列车控制分组域通信重要意义的基础上, 统一分析车载和地面列车控制设备无线通信过程中分组域和数据域的分配方法, 重点介绍了其软件实现方法和关键逻辑设计, 并提出一种融合电路域和分组域的列车控制车地无线通信分配方法, 其可被用于包括并不限于 CTCS 及 ETCS 等列车控制系统中。

**关键词:** 列车控制无线通信; 电路域; 分组域; 分配方法; 向前兼容; Subset037

中图分类号: U284.55

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2020)04-0063-04

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2020.04.013

## Analysis and Design of Allocation Method between CS and PS Wireless Communication of Train Control System

LIU Zhenyu, SONG Yan, QU Yongzheng

(Beijing Division, Hunan CRRC Times Signal & Communication Co., Ltd., Beijing 100079, China)

**Abstract:** The lately released Subset 037 with ERTMS B3R2 introduces the concept and the trend of packet switch in train control system. The importance of train control packet domain communication was firstly summarized, and the PS and CS domain allocation method in the vehicle to track-side wireless communication of train control system were analyzed with special focus on software implementation and key logic design. The PS and CS allocation method can be used in train control system including CTCS, ETCS and other train control systems.

**Keywords:** wireless communication of train control system; circuit switch; packet switch; allocation method; forwards compatibility; Subset037

### 0 引言

基于通信的列车控制系统是铁路信号领域的发展方向。一方面, 我国列车运行控制系统 (China train control system, CTCS)<sup>[1]</sup> 和欧洲列车运行控制系统 (European train control system, ETCS) 长期以来均基于铁路用国际无线通信标准 (global system for mobile communications-railway, GSM-R) 的电路域 (circuit switch, CS) 进行列车控制车地通信; 另一方面, 城市

轨道交通的列车控制通信<sup>[2-3]</sup>制式均基于分组域 (packet switch, PS), 大致有无线局域网 (wireless local area network, WLAN) 和长期演进 (long term evolution, LTE) 网络两种。尽管 WLAN 或 LTE 的带宽更高, 通信容量和跨区切换都比 CS 域通信有优势, 但是基于稳定性、车地实际容量需求 (6 s 交互一次) 以及向前兼容的要求, 铁路列车控制通信一直没有将 CS 域演进至 PS 域。然而, 随着无线通信技术向着 3G, 4G, 5G 甚至 6G 的迭代演进以及更多车地通信业务客观需求的不断呈现, 列车控制无线通信技术对 PS 域的支持势在必行。

在 2016 年正式发布的 ETCS 体系规范的基线 3 (3.6.0) 版本<sup>[4-7]</sup>中, Subset037: Euro Radio FIS<sup>[8]</sup>终于

收稿日期: 2019-09-04

作者简介: 刘振玉 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事铁路信号产品研发和列车控制系统设计工作。

基金项目: 湖南创新型省份建设专项 (2019GK4015)

引入了车地 PS 域通信的概念。与此同时,国内 CTSC 列控系统等级 1 (CTCS-1) 标准的制定,也将无线 PS 域通信作为 CTCS-1 列车控制车地通信的优选方式。作为高安全性、高可靠性的列车控制系统,其版本管理中“向前兼容”理念非常重要,也符合互联互通的基本思想。对列车控制无线通信而言,Subset037 描述了一套向前兼容 CS 域且更倾向于 PS 域进行实际通信的车载设备协调方法,但是对于如何在 PS 域和 CS 域之间进行分配和切换,没有进行详细定义和约束。本文在陈述列车控制 PS 域通信重要意义的基础上,对车载和地面列车控制设备无线通信的 CS 域和 PS 域分配方法进行分析,在明确分配原则的基础上,提出一种融合 CS 域和 PS 域的列车控制车地无线通信分配方法,并描述其软件实现方法和关键逻辑。

## 1 列车控制无线 PS 域通信的必要性

传统的 CS 域列控无线通信实际上是由基于 2G 标准的全球移动通信系统 (global system for mobile communications, GSM) 电路域来承载业务。随着移动通信技术的发展,列车控制无线通信也需要通过增加对于 PS 域通信的支持,来实现技术演进与革新。

### 1.1 向后兼容的需要

列车控制系统无线通信标准源于 GSM-R 标准,是在 20 世纪 90 年代移动通信从一代模拟通信向二代数字通信过渡期间基于 GSM 标准而制定的。GSM 属于二代移动通信技术,作为 CS 域通信的代表,相比于同时代的码分多址 (code division multiple access, CDMA) 技术,其在全球范围内获得了广泛的应用,至今仍旧是很多地区语音数字移动通信主力制式。在 GSM 基础上发展的 2.5 代通用无线分组业务 (general packet radio service, GPRS) 数据通信,其实已属于 PS 域通信;其后的 2.75 代增强型数据速率 GSM 演进 (enhanced data rate for GSM evolution, EDGE)、3G 通信、4G LTE 通信以及 5G 通信,都是基于 PS 域通信,在不断向前兼容的基础上,实现通信延迟降低和频谱效率提高 (高速度、高容量,即高带宽) 的目标<sup>[9]</sup>。

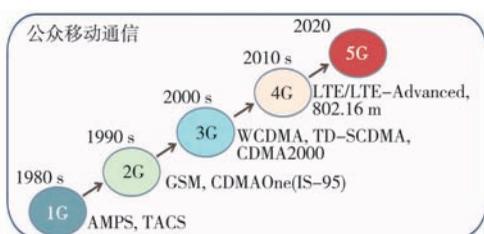


图 1 商用移动通信的发展

Fig. 1 Development of commercial mobile communication

虽然列车控制无线通信不必追随商用移动通信的演进步伐,但是从传统 CS 域过渡到兼容 PS 域,在无线网络互联网协议 (Internet protocol, IP) 化的趋势下,显得很有必要且更为紧迫。移动通信标准的制定者一开始就将兼容性作为重要指标设计考虑。一旦铁路信号设备实现了 PS 域通信的接口,那么无论是 3G, 4G, 5G 还是下一代移动通信,都可以无损地向后兼容。

### 1.2 更高带宽的需要

铁路信号控制系统车地通信交互带宽需求是综合闭塞原理和应用场景来考虑的。地铁 CBTC 系统,其移动闭塞和 90 s 追踪所需要的通信带宽大大增加,所以在一开始就选用了更高带宽、基于固定 IP 的 WLAN 或 LTE 通信,这样不仅可以满足列车控制系统的需要,还可以利用冗余带宽提供日志记录、司乘通信及旅客上网等服务。大铁路的 E23 和 C3 系统基于准移动闭塞和 5 min 追踪间隔的带宽要求, GSM-R 电路域通信可以满足。一旦大铁路通信由 CS 域扩展到 PS 域,那么自然也可以通过提高车地交互频度来发展移动闭塞、减小追踪间隔或是完成日志实时向地面回传;或者仅仅作为一个不影响电路域通信的 PS 域选项来构建一个全新的列车控制系统等级,正如 CTCS-1 级列车控制系统将 PS 域定义为唯一的通信制式,通过利用既有的有线 G 网 PS 域通信资源来实现无线车地通信。

### 1.3 多业务拓展的需要

根据欧标 B3R2 发布的一揽子标准,基于车地无线通信的 PS 域业务,可以扩展出一套车载 IP 通信资源,用于将未被 ETCS 应用的通信资源提供给车载其他应用进行 IP 通信。一个实际的例子就是在线密钥管理 (key management, KM) 通信。传统的密钥管理中心 (key management center, KMC) 只能通过离线方式更新或管理信号设备的密钥;有了 PS 域的 IP 通信,车载设备便可以通过空闲的移动终端 (mobile terminal, MT) 来呼叫 KMC,从而执行密钥的更新、删除、修改等任务,大大提高了密钥管理的效率,节省了人力和物力。

欧标的上述 IP 通信资源管理接口是作为通用接口设计的,当然可以不局限于在线 KM 通信,还可以扩展为车地的列车自动驾驶 (automatic train operation, ATO) 设备通信、车地语音应急通信等。

### 1.4 降低成本的需要

长期以来,铁路信号领域车地通信一直沿用了 GSM-R 标准的 CS 通信,其很多设备是通信厂商在 20 多年前开发的、成熟的产品;随着商用移动通信的演进,这些设备面临生产线被淘汰、零部件备件不足、

供货短缺的困境，所以其单品价格一直居高不下，且后期维护成本也很高。以地面无线闭塞中心 (radio block center, RBC) 设备所需要的综合业务数字网 (integrated services digital network, ISDN) 通信卡为例，每套 RBC 设备需要采购 4 块通信卡，单块 ISDN 通信卡最多可接收 30 辆车的无线呼叫，其外购成本占硬件成本的一半以上；若采用 PS 域通信，即便不插入 ISDN 卡，单个无线通信单元至少也可以支持 120 辆车的无线呼叫。由此可见，一旦车载设备全面支持 PS 域功能升级，RBC 的研发和生产成本将大大降低。同样，车载列车自动防护 (automatic train protection, ATP) 设备所采购的 MT 单元，在 CS 域通信下只能同时呼叫一个 RBC，这样至少需部署 2 台 MT 才能实现 RBC 的正常移交；一旦地面设备全面支持 PS 域功能升级，ATP 只需要部署一套 MT 即可通过 PS 域通信同时呼叫 2 个不同的 RBC，从而顺利完成移交。

综上所述，在 2G 通信的基础上，通过分配方法来兼容 PS 域通信扩展是列车控制无线通信发展的必然要求和趋势。鉴于此，本文将针对地面和车载列车控制设备，分别描述其在 CS 域和 PS 域通信切换和分配方法，并提出其软件实现的关键逻辑。

## 2 地面列车控制设备的分配方法及实现

地面列车控制设备通常作为无线通信的被叫端（车载列车控制设备作为主叫端），其应用接口分配方法相对简单，主要是同时在 CS 和 PS 通信模块接收不同类型的通信主叫信号，记录不同连接和会话 ID 以及 CS/PS 模式的匹配关系；在需要回复对应连接时，通过上述匹配关系，索引到正确的会话 ID 和 CS/PS 模式，然后对应回复给 CS 域或 PS 域通信模块。图 2 为地面列车控制设备 CS/PS 分配方法示意。

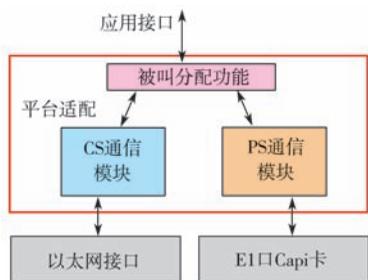


图 2 地面列车控制设备 CS/PS 分配方法  
Fig. 2 CS/PS allocation method of track-side device

下面按照逻辑步骤，详细描述地面设备的被叫端分配方法：

- (1) 完成被叫端的以太网通信 IP 配置和其他网络准备；
- (2) 被叫端同时在 CS 和 PS 通信模块接收不同类

型的通信主叫，记录不同连接和会话 ID 以及 CS/PS 模式的匹配关系；

(3) 被叫端需要发送数据回复对应连接或者进行连接管理时，通过上述匹配关系索引到正确的会话 ID 和 CS/PS 模式；

(4) 被叫端将数据和连接管理指令对应发给索引到的 CS 或 PS 通信模块的不同会话 ID。

由此可见，在地面列车控制设备的无线通信单元中，分配方法仅作为 CS 和 PS 通信功能模块的一个上层协调管理模块，即便是在 CS 或者 PS 模式单独存在的情况下，分配方法作为一个独立的软件模块也可以继续使用，其自适应功能不会带来额外的管理和配置成本。

## 3 车载列车控制设备分配方法及实现

车载列车控制设备作为主叫端，其分配方法不仅需要同时考虑应用接口和资源管理接口的需要，还要在以 PS 通信作为更优主叫选项的同时，向前兼容 CS 通信模式。

### 3.1 车载分配原则

以外接 2 个 MT 设备（MT 设备的电气接口为流控 RS422 接口）为例，车载设备主叫端分配原则如下：

(1) 分配方法轮询 2 个 MT 并尽可能建立 PS 模式通信，如果 PS 模式通信建立成功，则不再轮询，同时获得 MT 对应 PS 通信的本地 IP 地址。

(2) 主叫端在需要发起主叫通信时，分配方法首先根据其被叫设备 (RBC 设备) 支持的 CS/PS 通信类型，选择用 CS 模式还是 PS 模式发起主叫；被叫设备对于 CS/PS 通信的支持一般只需要查询一次，所以可以采用存取运行时文件的方式记录在设备中。如果被叫设备同时支持两种通信制式，则优先选用 PS 方式（图 3）。如果两个 MT 都没能建立 PS 通信，那将只用 CS 模式发起主叫。特别是，当被叫设备均支持 PS 通信且至少有一个 MT 建立 PS 通信并获取本地 IP 地址时，可以实现单个 MT 情况下两个 RBC 设备非中断通信式平稳移交。

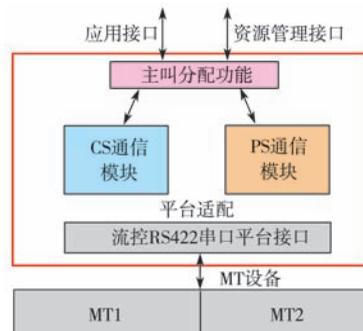


图 3 车载列车控制设备 CS/PS 分配方法  
Fig. 3 Allocation method of onboard device

- (3) 对于分配给 CS 或 PS 不同通信模块的主叫会

话连接,主叫端需要记录不同连接和会话 ID 以及 CS 或 PS 模式的匹配关系。

(4) 在主叫端随后需要回复对应连接或者进行连接管理时,通过上述匹配关系索引到正确的会话 ID 和 CS 或 PS 模式。

(5) 主叫端将回复和连接管理指令对应发给索引到的 CS 或 PS 通信模块的不同会话 ID。

(6) 主叫端可在 PS 通信基础上通过资源管理接口扩展其他 IP 车地通信。

### 3.2 主叫 IP 和 ID 管理

为了解决商用移动通信终端设备从 CS 域向 PS 域演进的兼容问题,第三代合作伙伴计划组织(3rd generation partnership project, 3GPP)扩充了移动设备终端的 AT (attention) 指令集,用以支持本地无线网络 IP 化查询以及被叫设备 PS 域状态的查询。

针对第 3.1 节“车载设备主叫端分配原则”第 2 条, Subset037 中的附录 I 给出了主叫 IP 和 ID 管理功能的建议性(非强制)实现流程(图 4),其适用于车载主叫连接发起、运行时文件中没有记录被叫 RBC 对 CS/PS 通信支持的情况。此外,还存在主叫连接发起、通过运行时文件查询到被叫 RBC 支持 PS 通信的情况,以及主叫连接发起、通过运行时文件查询到被叫 RBC 仅支持 CS 通信的情况。

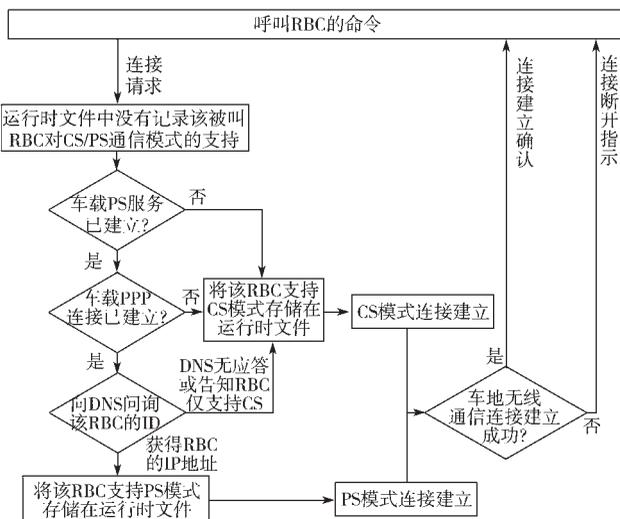


图 4 主叫 IP 和 ID 管理功能的流程示例

Fig. 4 Process example of IP and ID management by calling side

软件实现时,可将图 4 所示的多重状态机跳转简化为“PS 服务建立”和“被叫方模式/地址查询”两个步骤,从而在确保尽量少改动 CS 通信模块软件的原则下,利用独立开发的新分配功能模块和 PS 通信模块,通过标准化接口将三者合并组装,最终可实现新版欧标 Subset037 的全部通信功能模块(communication

functional module, CFM) 功能。

### 3.3 PS 域的业务拓展

由于 PS 域的功能拓展性和带宽都远胜过电路域的,基于接入点名称(access point name, APN)技术,车载欧洲安全计算机(European vital computer, EVC)可在 PS 域通信基础上通过资源管理接口扩展其他 IP 车地通信。在目前的应用场景下,不同的 APN 至少包括 ETCS, KM 和 ATO。通过统一的资源管理接口,车载列车控制设备可以任意拓展支持在线 KM 及基于车地通信的 ATO 控车等功能(图 5)。

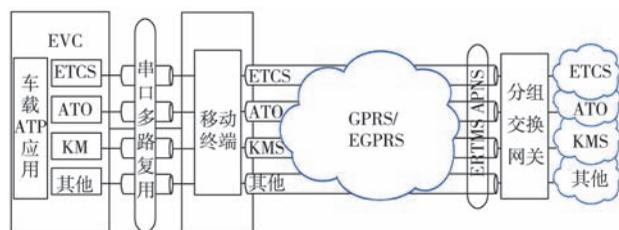


图 5 主叫分配方法的 PS 域业务拓展

Fig. 5 Packet domain expansion based on calling allocation method

## 4 实现与应用

对于上文所述的列车控制设备分配方法,在软件开发初期,以统一的软件模块对地面分配功能和车载分配功能进行一体化开发与维护,并采用 C 语言进行逻辑开发,从而完成嵌入式设备烧写、功能验证和合格性测试等任务。

目前,包含了本文所设计的分配方法的 037CFM 软件库已经通过了地面 RBC 和车载 ATP 产品的安全认证及欧标 TSI(technical specification for interoperability)认证。值得注意的是,根据列控安全通信标准 EN50519:2010<sup>[10]</sup>的要求,车地无线网络开放传输系统的通信威胁防护全部由 Subset037 的安全功能模块(safety functional module, SFM)层及其应用层承担,CFM 只能为通信层功能软件使用。

## 5 结语

本文提出了一种融合 CS 域和 PS 域的列车控制车地无线通信分配方法,其技术优势主要有:(1)在向前兼容 CS 域通信基础上,支持 2.5G, 3G, 4G, 5G 乃至全部 PS 域通信方式;(2)主叫端(车载 ATP 端)可管理包括但不限于两个 MT 终端,且尽可能采用 PS 域通信方式发起主叫,特别是可实现单 MT 情况下和两个被叫设备非中断通信式平稳移交,实现降本增效;(3)被叫端(RBC 端)通过对 PS 域通信的支持,可以减少对 ISDN 通信卡的依赖,从而大大降低设备成本; (下转第 72 页)