

基于5G技术的新一代列控通信系统研究

谢和欢^{1, 2}

(1. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070;

2. 北京市高速铁路运行控制系统工程技术研究中心, 北京 100070)

摘要: 新一代高铁列车列控系统智能化要求, 使车地通信数据较之前更为丰富多样, 数据传输的安全可靠性要求更高, 延时要求更低。原有的基于 GSM 的列控通信系统已经不能满足新需求, 需要研发新的基于 5G 技术的新一代列控通信系统。对 5G-R 通信系统进行研究, 设计新的基于嵌入式系统的车载电台, 提出地面网络系统的结构、组成和接口。详细分析业务数据在整个车地传输过程所经历的协议封装 / 解封和接口传递过程, 阐述新一代列控通信系统在满足未来车地通信要求的适应性, 为高铁列控智能化奠定通信基础。

关键词: 5G-R; 列控系统; 车地通信系统; 车载电台; PPP

中图分类号: U284.48

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2021)12-0038-08

Research on New Generation of Train Control Communication System Based on 5G Technology

Xie Hehuan^{1, 2}

(1. CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd, Beijing 100070, China)

(2. Beijing Engineering Technology Research Center of Operation Control Systems for High Speed Railways, Beijing 100070, China)

Abstract: The requirements for intelligent train control systems of the new generation of high-speed railways make the train-ground communication data richer and more diverse than before, and there are requirements for safer and more reliable data transmission and for lower delays. The original train control communication system based on GSM cannot meet the new requirements, so it is necessary to develop a new generation of train control communication system based on 5G technology. In this paper, a 5G-R communication system is studied, a new onboard radio based on embedded system is designed, and the structure, composition and interface of ground network system are proposed. The protocol encapsulation/de-encapsulation and the interface transmission process of service data in the whole train-ground transmission process are analyzed in detail, and the adaptability of the new generation of train control communication system to meet the requirements of future train-ground communication is expounded, which lays a communication foundation for intelligent train control for high-speed railways.

Keywords: 5G-R; CTCS; train-ground communication system; onboard radio; PPP

2020年8月中国国家铁路集团颁布了《新时代交通强国铁路先行规划纲要》(简称纲要),提出到2035年,要率先完成现代化铁路网建设,建成智能高铁实现智慧铁路。纲要特别提出要自主研发新型智能列控系统,智能牵引供电系统,智能综合调度指挥系统以及新一代铁路移动通信系统,推进北斗卫星导航系统和5G应用,运用大数据、互联网等现代信息技术提升铁路现代化水平。可以预见,未来高铁列控系统将是北斗、5G通信等新技术为基础的新一代智能控制系统。

1 新一代列控系统简述

国内列车运行控制系统根据系统配置按功能从CTCS-0到CTCS-4划分为5级,其中,CTCS-2和CTCS-3是目前国内高铁主流使用的列控系统。而CTCS-4系统则是基于移动闭塞、北斗导航、自动驾驶和5G通信等技术研制的新一代列车控制系统,智能化程度高,在国内高铁列控技术中具有里程碑意义。

2 新一代列控无线通信系统概述

在2020年前,国内铁路专网通信系统倾向从GSM-R演进至LTE-R。但从技术上看,LTE-R依然存在车地无线通信的切换稳定性、空口时延等问题。随着5G上升为国家战略,铁路通信网将从GSM-R时代进入5G-R时代,为大数据技术在铁路的应用提供基础,以提高铁路信息化、智能化水平,促进产业提质升级。

5G作为一种新型移动通信技术,具有高带宽、高速度、大容量、低功耗、低时延、万物互联、信息可感知可调控的特征,可以满足未来虚拟现实、智能制造、自动驾驶等应用需求。是智能化时代的标志性技术和重要的基础设施,是满足新一代列控系统无线通信需求的最佳选择。

车地数据通信是保障列控系统运行的关键核心业务,其传输速率、可靠性和安全性要求高,是5G-R的主要应用场景之一。因此,开展5G-R的列控车地通信技术研究,对于实现列车运行控制、列

车自动驾驶,保障铁路安全、可靠、高效运营,对于促进智能铁路的发展都具有重要意义。5G-R的车地通信系统的核心设备包括5G-R车载电台、接入网(基站)、核心网等。其基本结构如图1所示。车载设备(ATP/ATO)通过车载电台接入5G-R网络,无线闭塞中心(RBC)通过数据网络(Data Network, DN)接入。其中,5G-R车载电台和列控数据传输是本文的研究重点。

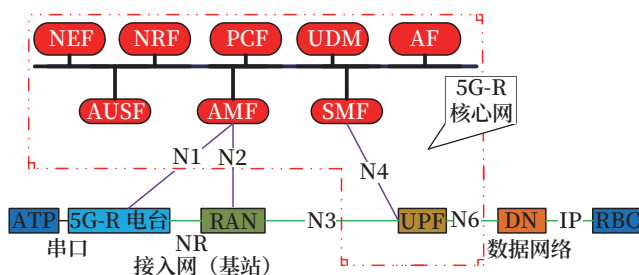


图1 5G-R列控通信系统基本结构

Fig.1 Basic structure of 5G-R train control communication system

3 5G-R车载电台基本设计

5G-R电台是适应于5G-R列控通信系统的车载无线接入终端,是列控系统车载设备的重要组成部分,它通过5G-R网络与RBC建立起数据传输通道来传输列控信息;通过串口与车载无线传输单元相连,进行AT指令交互和业务数据收发。

3.1 系统结构

5G-R车载电台是嵌入式系统与5G Modem的结合。在其上运行了电台核心控制程序,用于处理和车载ATP的AT指令交互以及点对点协议(Point to Point Protocol, PPP)的过程处理和具体配置。在其操作系统内封装PPP协议和TCP/IP协议栈,具备拨号上网功能。

3.2 与ATP的接口

5G-R电台和ATP的无线传输单元RRC之间通过RS-422串口连接,串口中的TxD+、TxD-、RxD+、RxD-4根信号线差分传输AT指令、结果码和数据。其中,指令和结果码以ASCII码传输,数据以比特流方式透明传输。RRC与5G-R电台之间通过RTS、CTS、DSR、DTR、DCD等硬件握

手信号控制数据的传输时机。

3.3 AT指令

AT 指令是用于数据终端设备与数据电路终端之间连接与通信的协议，通常采用标准串口来收发。ATP 通过 AT 指令控制电台参数配置，获取终端信息，发起与 RBC 的拨号连接，建立 5G-R 通信链路。不同制式的移动台有各自的 AT 指令集。针对 5G-R 电台，新增了部分 AT 指令以适应电台的新特性。例如：AT+CG5QOS 用于设置 5G QoS 参数；AT+C5GREG 为 5G 网络注册状态相关 AT 命令；AT+CGDCONT 设置命令用于定义分组数据协议上下文参数。

3.4 PPP协议

PPP 属于数据链路层协议，是一种在点对点链路上传输多协议数据报文的标准方法。PPP 协议之下是以太网或串口等物理层，之上是 IP 协议等网络层。PPP 规定了数据帧封装方法和交互流程，主要用来通过拨号或专线方式建立点对点连接以接收发数据。PPP 协议主要由 3 部分组成：链路控制协议（LCP）、网络控制协议（NCP）和 PPP 扩展协议。LCP 是 PPP 协议的底层部分，用来配置、建立、测试和关闭数据通信链路。NCP 是 PPP 协议的高层部分，用来建立和配置不同的网络层协议，主要作用是获取通信双方的网络层地址。NCP 包括一族网络控制协议，常见的有用于 TCP/IP 网络使用的 IPCP 网络控制协议和用于 SPX/IPX 网络的 IPXCP 网络控制协议等。PPP 协议组成示意如图 2 所示。5G-R 电台使用的 NCP 协议是 IPCP 协议。在 5G-R 电台实现 PPP 协议是让电台具备拨号上网功能的关键。

PPP	IP	IPX	其他网络协议	网络层
	IPCP	IPXCP	其他NCP	链路层
	网络控制协议 验证, 其他选项 LCP			链路层
	物理介质(同步/异步)			物理层

图2 PPP协议组成示意

Fig.2 Schematic diagram of the composition of PPP protocol

3.5 连接建立过程

列车在经过 5G-R 无线覆盖区域前，会从地面应答器读到准备切换为 5G-R 网络的预告命令，此时 ATP 会向 5G-R 电台发出：AT + COPS? 指令查询电台注册状态，如果电台返回：13, +COPS: 1, 2, “46020”，7 则表示电台已经注册到 5G-R 网络。然后，ATP 不断向电台发出：AT+CSQ 指令检测信号强度，以准备发起 PPP 拨号。列车继续前行，当列车从地面应答器读到切换为 5G-R 网络的命令时，ATP 向 5G-R 电台发出：AT + CGDATA= “M-0000”，1 指令，使电台进入分组交换 (Packet Switch, PS) 域状态，并使 5G Modem 进入连接状态。若电台返回：CONNECT 则表示连接 5G-R 网络成功。ATP 随后开始发起 PPP 链路建立过程，按照 PPP 协议建立数据通信链路。ATP 首先按照 LCP 协议同电台动态协商配置串口链路参数，然后按照 NCP 协议协商 PPP 报文的网络层参数以获取 IP 地址。NCP 过程成功后，在 ATP 系统和电台内部都会映射出一个虚拟网络接口 ppp0，并被注册到各自的 TCP/IP 协议栈中。这时，ATP 就可以通过这个虚拟网卡提供的 socket 接口与 RBC 建立 IP 网络连接传输 IP 报文了。

3.6 数据传输处理过程

ATP 上的应用程序向 RBC 发送 IP 数据包，这些 IP 数据包经过 TCP/IP 协议栈流向内核 PPP 协议处理模块（PPP 驱动），PPP 驱动将 IP 包按 PPP 协议封包后发送到 PPP TTY 线路规程，TTY 线路规程将 PPP IP 数据帧格式化后发送给 TTY 驱动程序，这样，经 PPP 封装后的 IP 数据包就被串口发送出去。数据收发过程如图 3 所示。

5G-R 电台中的 PPP 协议栈从串口读入 PPP 帧，并对 PPP 过程控制帧和 IP 应用数据帧进行分流。PPP 过程控制帧则会被放到操作系统的 /dev/ppp 设备队列中，5G-R 电台上的核心控制程序会读取该队列的数据进行 PPP 过程处理，以完成和 ATP 的 PPP 交互过程。而应用数据帧中的 IP 包被提交到内核的 TCP/IP 协议栈，然后交由电台空口

无线协议栈进一步处理后，通过无线信道发送到 5G 基站，再经 5G 核心网最后送达 RBC。这样便实现

了车载电台控制路径与数据路径，策略与机制的有效分离，使系统结构更优化。

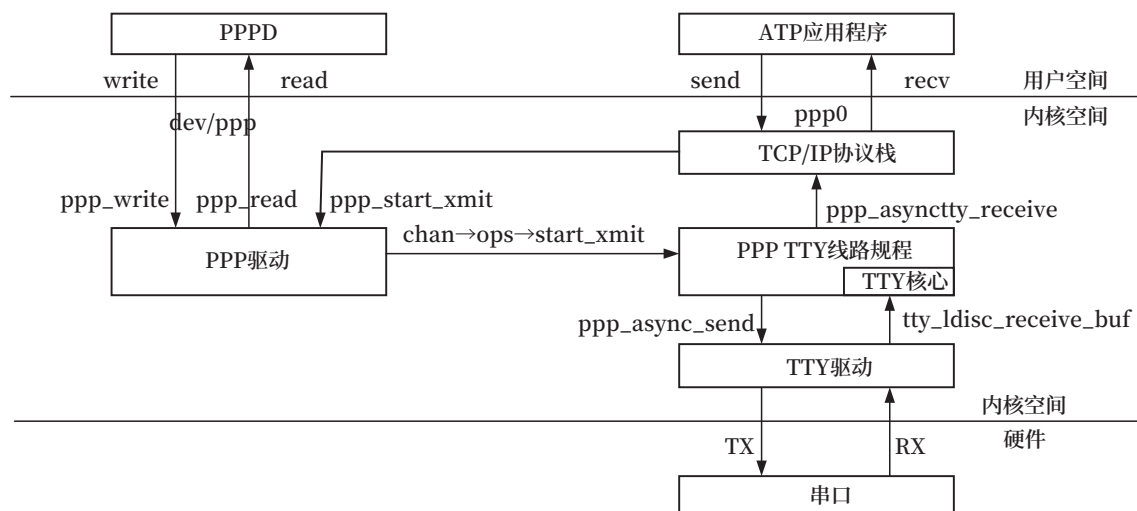


图3 PPP帧传输示意

Fig.3 Schematic diagram of PPP frame transmission

5G-R 电台从基站接收的数据经空口无线协议栈处理还原出 IP 包后被送到电台内核的 TCP/IP 协议栈，由于 IP 包中目的地址为 ATP 的 IP 地址，这些 IP 包会被电台的 TCP/IP 协议栈发送到 PPP 驱动，由后者按 PPP 协议封装后送到 TTY 线路规程，然后经 TTY 驱动通过串口发送给 ATP。ATP 上的 PPP 协议栈从串口读入 PPP 帧，同样对 PPP 过程控制帧和应用数据帧分别处理。提取出来的 IP 包被提交到 ATP 内核的 TCP/IP 协议栈，然后由协议栈发送给 ATP 应用程序。这样，从 RBC 来的 IP 包就被送到了 ATP。

4 5G-R电台空口无线协议栈设计

5G-R 电台的空口采用 5G 标准的新空口 (New Radio, NR)，NR 是基于正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 设计的全新空口，可以实现超低时延和高可靠性，非常有利于车地通信数据的高速可靠传输。

5G-R 电台无线协议栈也分为控制面和用户面两个平面。其中，控制面 (Control Plane, CP) 协议栈是传输控制信令所采用的协议簇。用户面 (User Plane, UP) 协议栈是传输用户数据所采用

的协议簇。

5G-R 电台无线协议栈控制面与 LTE-R 基本一致，分为网络层 (L3)、数据链路层 (L2) 和物理层 (L1)。L3 包括非接入层 (Non-Access Stratum, NAS) 和无线资源控制层 (Radio Resource Control, RRC)。L2 包括分组数据汇聚协议层 (Packet Data Convergence Protocol, PDCP)，无线链路控制层 (Radio Link Control, RLC) 和媒体接入控制 (Medium Access Control, MAC)。对于用户终端 (UE) 侧，所有的控制面协议栈都位于 UE 内。而对于网络侧，除 NAS 层位于核心网的接入和移动管理功能 AMF 网元，其余均位于 5G 基站 gNB 上，具体如图 4 所示。

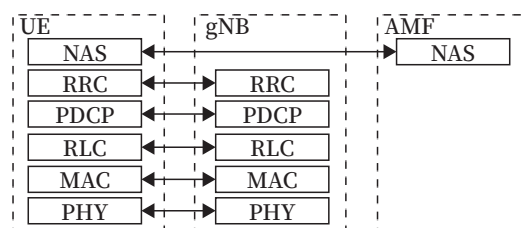


图4 NR无线协议栈控制面示意

Fig.4 Schematic diagram of the control plane of NR wireless protocol stack

5G-R 电台无线协议栈用户面协议栈分为数据链路层 (L2) 和物理层 (L1)。L2 相对于

LTE-R 增加了服务数据适应协议层 (Service Data Adaptation Protocol, SDAP)。对于 UE 侧, 所有的用户面协议栈都位于 UE 内。对于网络侧, 用户面协议栈也同样都存在于 gNB 内, 如图 5 所示。

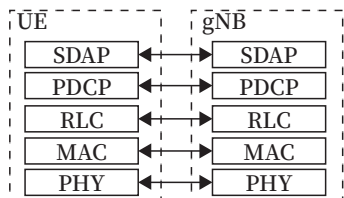


图5 NR无线协议栈用户面示意图
Fig.5 Schematic diagram of the user plane of NR wireless protocol stack

4.1 SDAP子层

5G 网络中无线侧依然沿用 4G 网络中的无线承载的概念, 但 5G 中的核心网为实现更加精细化业务, 其基本的业务通道从 4G 时代的数据无线承载 (Data Radio Bearer, DBR) 的概念细化到以服务质量 (Quality of Service, QoS) 流为基本业务传输单位。这样一来, 在无线侧的 DBR 就需要与 5G 中的 QoS 流进行映射, 这就需要增加一个适配子层 SDAP, 来完成对 QoS 流与 DBR 之间的映射并为数据包添加 QFI (QoS flow ID) 标记。也就是说 5G 包括两层映射: 一层是用户平面功能 (UPF) 实现 IP 流到 QoS 流的映射。另一层是 gNB 实现 QoS 流和无线承载 DBR 的映射。

LTE 系统中 QoS 由核心网来控制, 无线侧只能被动适配, 5G 系统中 QoS 由无线侧控制, 因而更加灵活; 4G 的承载粒度较粗, 单用户最多 8 个 DBR, 5G 的承载粒度更细, 基站和 UPF 最多可达 64 个 QoS 流, 空口单用户最多可达 16 个 DBR。5G 接入网和核心网通过将数据 IP 流映射为适当的 QoS 流 (根据时延、传输速率等要求) 和 DBR 以确保数据传输的服务质量, 非常适合于要求延迟低而可靠性高的列控业务。

4.2 PDCP子层

在用户平面上, PDCP 子层接收 SDAP 数据, 完成数据的加解密、完整性保护验证及头压缩后, 递交到 RLC 子层。PDCP 子层还向 SDAP 层

提供按序提交和重复分组检测功能。在控制平面, PDCP 子层为上层 RRC 提供信令传输服务, 并实现 RRC 信令的加密和一致性保护, 以及在反方向上实现 RRC 信令的解密和一致性检查。

4.3 RLC子层

RLC 为用户和控制数据提供分段和重传业务。RLC PDU 的数目根据 MAC 层传输块 (TB) 的大小来传输。如果 MAC 层 TB 的大小不足以传输完整的 RLC PDU, 则对 RLC PDU 进行分段; 当 MAC 层的混合式自动重传请求 (Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ) 已经用尽重发次数, RLC 会继续重发。

RLC 有 3 种模式, 分别是 TM 透明模式、UM 重发非确认模式、AM 重发确认模式。AM 模式在高层数据上添加必要的控制协议开销后进行传送, 并保证传递到对等实体。一般用于数据业务, 尤其适合包括列控业务在内的关键核心业务的数据。

4.4 MAC子层

MAC 子层即媒体接入控制子层, 负责无线资源分配与管理, 实现逻辑信道到传输信道的映射处理。具体功能包括逻辑信道复用、信道转换、优先级处理、调度管理以及基于 HARQ 机制的错误纠正和重传功能。对于上行: 复用从一条或多条逻辑信道下来的数据 (MAC SDUs) 到传输块, 并通过传输信道发送到物理层。对于下行: 把从传输信道传送过来的传输块解复用成 MAC SDU, 并通过相应的逻辑信道, 投递到 RLC 层。

4.5 PHY层

物理层是通过 MAC 子层的传输信道向高层提供数据传输服务。物理层主要解决的是: 如何通过一定带宽的“基带”无线电磁波信号 (无数个正交的子载波), 为多个不同的用户, 发送一连串经过调制、编码后的比特数据。5G 物理层的主要功能是: 错误检测、FEC 加密解密、速率匹配、物理信道的映射、调整和解调、频率同步和时间同步、无线测量、MIMO 处理、射频处理。5G-R 车载电台物理层的功能结构如图 6 所示, 主要涉及到无线资源、

多址技术、调制技术、编码技术等，具有 nFAPI、eCPRI、CPRI 3 大接口。相比于 LTE 物理层，5G 物理层调制和编码效率更高，对信道处理更稳健。有利于提高 5G-R 车载电台的系统稳定性。

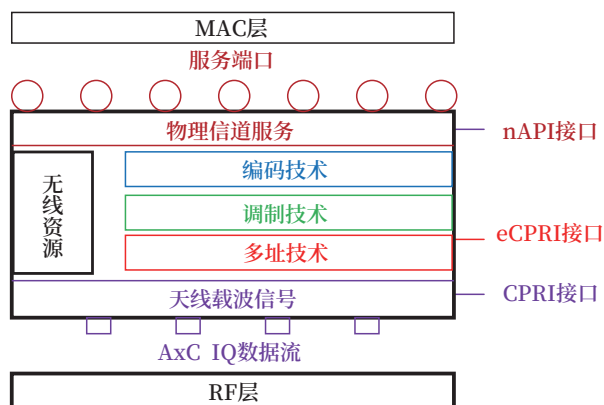


图6 5G-R电台物理层的功能结构
Fig.6 Functional structure of the physical layer of 5G-R radio

5 列控业务数据在空口无线协议栈的处理过程

从数据上行过程（ATP 到 RBC）方向来看，列车运行过程中形成的列控业务数据被封装在一个或多个 IP 数据包中。一个个连续的 IP 数据包形成 IP 数据流。5G-R 电台的 UPF 收到来自 ATP 的 IP 数据流后，会根据列控业务的 QoS 需求，将 IP 数据流映射为 QoS 流，并在数据的封装报头中打上 QFI，以标记数据所属的 QoS 流。接着，QoS 流被送到空口协议栈链路层的 SDAP 子层，SDAP 根据基站提供的 QoS 到 DBR 的映射关系，将 QoS 流映射到对应的 DBR 上。然后，SDAP 将 IP 包打包为 PDU（增加 SDAP 协议头）投递给 PDCP 层。

当 SDAP PDU 到达 PDCP 子层后，成为 PDCP 层的 SDU，SDU 首先被存储在一个缓冲区中。随后，PDCP 层对到达的 SDU 进行序列编号，以便于接收端准确判断出数据分组是否按序到达，以及是否有重复分组，从而能对数据进行重组。缓存是 5G NR 新增的功能，进一步保障了数据传输的可靠性，非常适合于列控业务数据的无线传输。然后，PDCP 层会将 SDU 中的 IP 包的头部进行压缩，并将 IP 包加密（加密机制进一步保证了车

地列控业务数据的安全性），再将 SDU 添上 PDCP 协议头，成为 PDCP PDU，随后通过服务访问点（Service Access Point, SAP）送到 RLC 层成为 RLC SDU。

RLC PDU 的大小是由 MAC 层指定，RLC 层需要分段 / 串联 RLC SDU 以适应 RLC PDU 的大小，并添加 RLC 协议头形成 RLC PDU。针对列控业务，5G-R 电台 RLC 层会采用 AM 工作模式为其提供可靠数据传输，将 RLC PDU 通过逻辑信道传递给 MAC 层。如果数据传输有问题，RLC 层会重传该 RLC PDU。这进一步保证了列控业务数据车地通信的可靠性。

RLC PDU 通过逻辑信道到达 MAC 子层后，成为了 MAC SDU。MAC 子层的 MAC PDU 具有一个头部，若干控制单元，若干 MAC SDU，可能还有填充位。每一个控制单元对应一个 SDU 或者填充位。MAC PDU 会通过传输信道被送到物理层。

从 MAC 层发往物理层的 MAC PDU 是以传输块（Transport Block, TB）的形式组织的。在物理层中，TB 第一步要经过 CRC 循环冗余校验，经过信道编码后进行速率匹配，形成码字。第二步是对码字进行扰码操作从而得到新的加扰后的比特序列，以避免不同的电台和小区之间的干扰。第三步是对加扰后的比特序列进行调制。调制后得到的复数值信号，要进行层映射和预编码，预编码结果通过天线端口映射得到复数信号，每个复数信号和子载波运算后形成 OFDM 符号。OFDM 符号再经过 D/A 转换、功放、射频等一系列操作最终发射出去。数据在空口无线协议栈的处理过程如图 7 所示。

从数据下行过程（RBC 到 ATP）方向来看，就是上述过程的一个反向过程。

6 5G-R网络架构设计

5G-R 的网络架构主要包括无线接入网（RAN）和核心网（5GC）。在 5G-R 网络中，RAN 不再像 LTE 接入网那样由 BBU、RRU、天线组成。而是被重构为 3 个功能实体：集中单元（Centralized

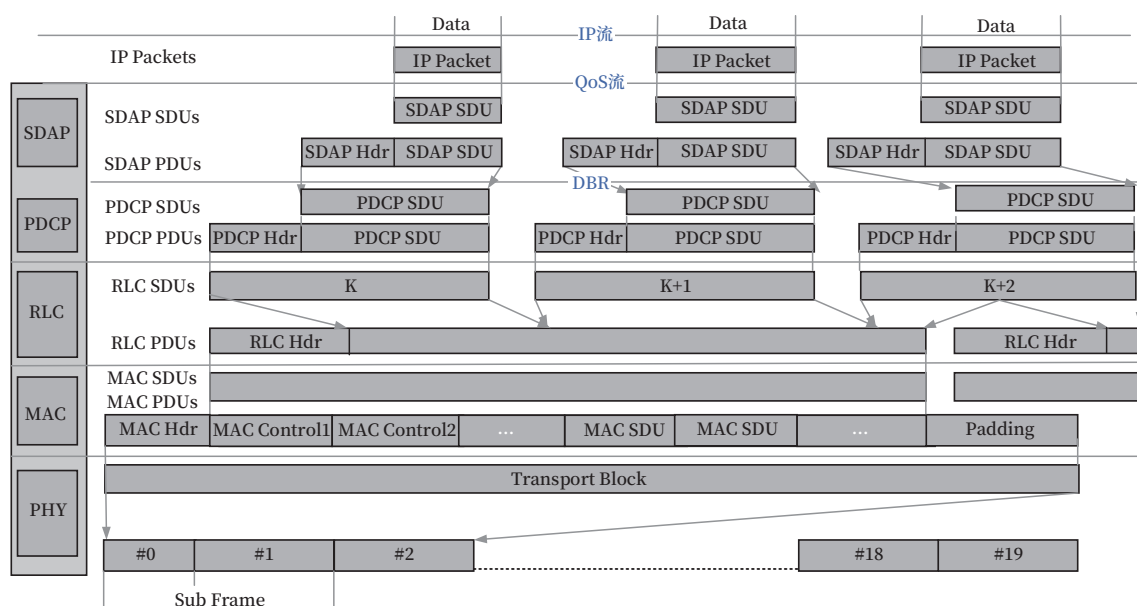


图7 5G-R电台空口无线协议栈
Fig.7 Air interface wireless protocol stack of 5G-R radio

Unit, CU)、分布单元 (Distribute Unit, DU) 和有源天线单元 (Active Antenna Unit, AAU)。其中, CU 由 BBU 的非实时部分分割出来, 负责处理非实时协议和服务。DU 由 BBU 的剩余功能组成, 负责处理物理层协议和实时服务。AAU 由 BBU 的部分物理层处理功能与原 RRU 及无源天线合并而来。这样一来, CU 就可以集中部署, 并进行网元功能虚拟化 (NFV), 大大降低 5G-R 网络建设成本。

原 LTE 核心网在 5G-R 中被拆分为 5G 核心网 (5G Core, 5GC) 和移动网络边界计算平台 (Mobile Edge Computing, MEC) 两部分。这种拆分、细化, 可以实现网络切片, 以更灵活地应对不同铁路通信业务对于网络的不同特性要求的特定场景需求。切片, 简单来说, 就是把一张物理上的网络, 按应用场景划分为 N 张逻辑网络。不同的逻辑网络, 服务于不同场景。例如, 为列控业务单独分配一个切片, 满足其速度、延时和连接数的要求, 让其不受其他业务的影响, 以充分保证列控业务传输的稳定可靠。5GC 采用的是基于服务的架构 (Service Based Architecture, SBA), 该架构基于云原生构架设计, 把原来具有多个功能的整体,

分拆为多个具有独自功能的个体, 实现各自的微服务, 如图 7 所示, 其中虚线内为 5G-R 核心网。这样, 虽然网元数量大量增加了, 但由于网元硬件都是在虚拟化平台里面虚拟出来的, 故非常容易扩容、缩容, 也易于升级、割接, 并且相互之间不会造成太大影响。大大方便 5G-R 网络的构建。

7 列控业务数据在5G-R网络的处理过程

当 5G-R RAN 的基站通过 NR 空口收到来自车载电台的无线信号后, 经过无线协议栈处理后还原成列控业务 IP 包, 随后, IP 包被 RAN 使用 GTP-U 协议封装后通过 N3 接口送到 UPF, UPF 通过 N6 接口将 IP 包送到 DN, 最后安全可靠送达至 RBC。数据协议栈处理过程件如图 8 所示。RBC 发往 ATP 的数据传输同样是该过程的一个反向过程。

8 结束语

本文从车地列控业务传输角度对基于 5G 技术的新一代列控通信系统 5G-R 进行研究, 分析了数据在整个传输过程所经历的协议封装 / 解封过程, 阐述 5G-R 在满足列控业务传输速率、低延时、可

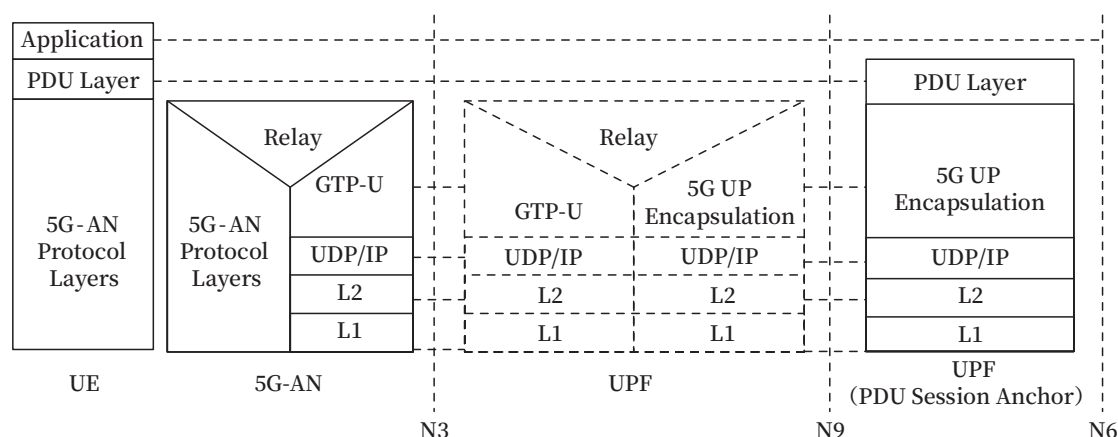


图8 5G-R网络协议栈
Fig.8 5G-R network protocol stack

靠性等特性要求的适应性。创新了5G-R车载电台的设计开发方法，提出地面网络系统的结构、组成和接口。新研制的5G-R车载电台使车载设备可以无需改造硬件接口，就能实现从支持GSM-R通信转换到支持5G-R通信，既能满足未来CTCS-4列控传输车地数据（包括列控信息、列车自动驾驶信息、列车安全防护预警信息等）的业务要求，也能满足车载运营维护信息的传输要求，为高铁列控智能化奠定了通信基础。

参考文献

- [1] 中国国家铁路集团有限公司. TJ/DW 237-2020 新型列控系统车地通信接口暂行技术要求 [S]. 北京：中国国家铁路集团有限公司，2020.
- [2] 中国国家铁路集团有限公司. TJ/DW 229-2020 号青藏铁路新型列控系统暂行技术规范 [S]. 北京：中国国家铁路集团有限公司，2020.
- [3] 王映民，孙韶辉. 5G 移动通信系统设计与标准详解 [M]. 北京：人民邮电出版社，2020.
- [4] 刘晓峰，孙韶辉，杜忠达. 5G 无线系统设计与国际标准 [M]. 北京：人民邮电出版社，2019.
- [5] Wan Le, Liu Jianguhua, Wu Yong, 等. 5G 系统设计——端到端标准详解 [M]. 北京：电子工业出版社，2021.
- [6] 埃里克·达尔曼，斯特凡·巴克浮，约翰·舍尔德. 5G NR 标准：下一代无线通信技术 [M]. 北京：机械工业出版社，2019.
- [7] 张建国，杨东来，徐恩，等. 5G NR 物理层规划与设计 [M]. 北京：人民邮电出版社，2020.
- [8] 谢和欢. 支持 GSM-R 与 LTE-R 通信的双模车载电台技术研究 [J]. 铁路通信信号工程技术，2020，17(8)：53-61.
- Xie Hehuan. Technical Research on Dual-Mode Onboard Radio Supporting both GSM-R and LTE-R Communication[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17(8): 53-61.
- [9] Andrew S Tanenbaum, David J Wetherall. 计算机网络 [M]. 5 版. 北京：清华大学出版社，2012.
- [10] Behrouz A. Forouzan, Sophia Chung Fegan. TCP/IP 协议族 [M]. 北京：清华大学出版社，2001.

(收稿日期：2021-08-25)

(修回日期：2021-10-21)