

基于 C-V2X 技术的车载终端设计与验证

张 泽¹, 郭剑锐², 王梦丹³, 袁晓静¹, 曾繁琦¹

(1. 火箭军工程大学, 陕西 西安 710025;

2. 东风汽车集团有限公司研发总院, 湖北 武汉 430100;

3. 中国汽车技术研究中心(天津)汽车工程研究院有限公司, 天津 300300)

摘 要: 针对 V2X (Vehicle-to-Everything) 车载终端需要满足高速行驶车辆低延迟、高速率和高可靠性的通信需求, 开展基于 C-V2X 技术的车载终端设计与验证。该终端采用 DMD31 芯片与主副处理器相结合的设计、主天线和分集天线的增益设计以及全新的任务调度与数据交互设计, 研究了该终端硬件系统与软件系统的结构和主要功能, 分别在静态场景和动态场景下对该终端的性能进行了测试。结果表明: 该终端在 200 m 内的通信时延低于 19.7 ms, 丢包率低于 0.03%; 与现有基于专用短程通信技术设计的车载终端相比, 平均通信时延降低了 0.4 ms, 通信距离大于 100 m 后丢包率降低了 1.8%。该终端的通信性能满足 3GPP TS 36.521 Release 15 标准规范, 可用于构建各类车路协同应用。

关键词: C-V2X; 车载终端; 硬件设计; 软件设计

中图分类号: TN871

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)02-049-08

Design and Verification of the C-V2X-based Onboard Terminal

ZHANG Ze¹, GUO Jianrui², WANG Mengdan³,

YUAN Xiaojing¹, ZENG Fanqi¹

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shaanxi;

2. Dong Feng Motor Corporation Research & Development Institute, Wuhan 430100, Hubei;

3. CATARC (Tianjin) Automotive Engineering Research Institute Co. Ltd, Tianjin 300300, China)

ABSTRACT: To meet communication requirements of vehicles running at high speed such as low latency, high rate, and high reliability, an onboard terminal was designed based on C-V2X technology and verified. A combined design of DMD31 chip and main and sub processors, a gain design of main antenna and diversity antenna, and a new task scheduling and data interaction design were introduced to study the structures and main functions of the hardware system and the software system of the proposed terminal specifically. Furthermore, the performance of the proposed terminal was verified in static scenes and dynamic scenes. Results showed that, within 200 m, the communication delay of the proposed terminal is less than 19.7 ms and the packet loss rate is less than 0.03%. Compared to DSRC-based onboard terminals, the average communication delay is reduced by 0.4 ms, and the packet loss rate is reduced by 1.8% beyond 100 m. The communication performance of the proposed onboard terminal meets the 3GPP TS 36.521 Re-

收稿日期: 2024-01-31

第一作者: 张泽 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事车辆工程及装备保障研究。E-mail: zhangzebut@163.com

引用格式: 张泽, 郭剑锐, 王梦丹, 等. 基于 C-V2X 技术的车载终端设计与验证[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (2): 49-56.

lease 15 standard specification. Based on the terminal, various vehicle-road collaborative applications can be constructed.

KEYWORDS: C-V2X; onboard terminal; hardware design; software design

国际移动通信 2030 (Internation Mobile Telecommunication-2030, IMT-2030) 在新技术的发展和现有技术的提升方面做出了极为突出的贡献, 其认为车联网行业中最具前景的技术之一便是智能运输系统 (Intelligent Transportation Systems, ITS)^[1]。ITS 由中心子系统、路侧设备 (Road Side Unit, RSU) 和车载终端 (Onboard Unit, OBU) 构成, 中心子系统是系统的“大脑”, RSU 负责将道路的“感官”信息处理、传递, OBU 作为移动端安装在汽车上。当车辆到达 RSU 的辐射范围内时, OBU 与 RSU 迅速建立通信, 通过特定的算法提供交通安全、交通效率、信息服务功能; 在没有 RSU 辐射的区域, 则通过 OBU 相互广播进行直连式通信^[2], 从而实现交通的智能管控。V2X (Vehicle-to-Everything) 技术是 ITS 的通信方式, 可分为 4 种类型: 车与网络 (V2N)、车与基础设施 (V2I)、车与车 (V2V)、车与人 (V2P)^[3]。

随着智能运输系统的逐步发展, 对 OBU 的设计提出了更高需求。对此, 张孝兵等^[4]提供一种基于 V2X 无线通信的车载智能终端, 可实现车与车、车与物的相互通信; 但该方案采用 IEEE 802.11p 标准, 覆盖范围有限, 峰值速率较低。邢珏等^[5]提出一种融合电子不停车收费系统 (Electronic Toll Collection, ETC) 和 V2X 功能的智能车载终端, 其 OBU 处理、传输的信息复杂, 使处理器算力加重, 通信效率较低。为此, Zadobrischi 等^[6]则使用了专用短程通信技术 (Dedicated Short Range Communications, DSRC) 开发了 2 台 MK5-OBU 设备, 进行了实际长道路测试, 结果显示: 无建筑物时链路正常, 距离 100~200 m 时的丢包率为 0; 在高挡建筑物环境中丢包率在 11% 到 20% 之间, 丢包率较高。研究发现^[7]DSRC 技术用于直连式通信的协议算法 CSMA-CD (带有冲突检测的载波侦听多路存取, Carrier Sense Multiple Access Collision Detection) 具有隐藏节点、数据竞争和冲突的问题, 通信距离有限, 且不能与现有的蜂窝移动网络集成。

相较于 NR-V2X 技术 (基于 5G 新空口的 V2X 通信技术, Nes Radio-Vehicle to Everything)

和 DSRC 技术, 长期演进 (Long Term Evolution, LTE) 技术在全球各级公路中广泛部署, 服务提供商多, 设备兼容性广, 更成熟、更可行、更优的成本效益。基于此, 本文使用基于 LTE-V2X (即 C-V2X) 技术的车联网通信模组开发车载终端, 专用频段 5 905~5 925 MHz, 与蜂窝式终端形成互补, 实现远距离、高可靠性通信。

1 总体方案

根据 ITS 需求, OBU 需要具备采集/传递数据、处理数据和终端管理 3 项功能^[8]。通过 OBU 内部集成 CAN 总线、定位和运动传感器等模块可实现数据采集。传统的 Wi-Fi 设备不适合支持高移动性和频繁的拓扑变化, 蜂窝网络则传输速率较低、延迟时间较长, 基于蜂窝网络的车载通信技术 C-V2X 进行通信模组研发, 必须对延迟时间、移动性、通信距离、传输速率、通信带宽和通信频段做优化处理。OBU 的核心业务是处理数据, 高性能处理器即可实现, 但是数据处理车辆的能源功耗有限, 需保证处理性能和功耗之间的平衡。尤其是车辆熄火后, 如果 OBU 静态电流过大会加速车辆电池亏电。本文采用主副处理器设计模式, 主处理器负责处理各模块数据, 副处理器负责终端管理, 通过通用输入输出引脚 (General-Purpose Input/Output, GPIO) 配置文件来改变芯片的引脚电压, 进行工作、待机和关机的模式切换, 实现工作时高效运行、车辆熄火时进入待机低功耗模式。

2 硬件系统

OBU 芯片 (模组) 型号如表 1 所示, 硬件系统架构设计如图 1 所示。

DMD31 模组基于 LTE-V2X 技术, 提供 Uu 接口 (蜂窝通信接口) 和 PC5 接口 (直连通信接口)。针对车辆行驶速度较高时易发生多普勒频率扩展和信道快速时变问题, PC5 接口对物理层结构增强, 可支持 500 km/h 的相对移动速度; 针对定位精度不高问题, 设计主天线和分集天线, 前

SDIO: 安全数字输入输出 (Secure Digital Input and Output)。
EMMC: 内嵌式存储器标准规格 (Embedded Multi Media Card)。
LPDDR3: 第3代低功耗内存 (Low Power Double Data Rate SDRAM)。
UART: 通用异步收发器 (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)。
RGMII: 精简吉比特媒体独立接口 (Reduced Gigabit Media Independent Interface)。
SMPS: 开关模式电源 (Switch Mode Power Supply), 是一种小型高频电能转压装置。
PHY: 端口物理层 (Physical Layer), 是以太网芯片。
LDO: 低压差线性稳压器 (Low Dropout Regulator)。
PMIC: 电源管理集成电路 (Power Management IC)。
JTAG: (Joint Test Action Group)。
LIN: (Local Interconnect Network)。
ADC: 模数转换器 (Analog to Digital Converter)。
I2C: (Inter-Integrated Circuit) 同步串行总线。

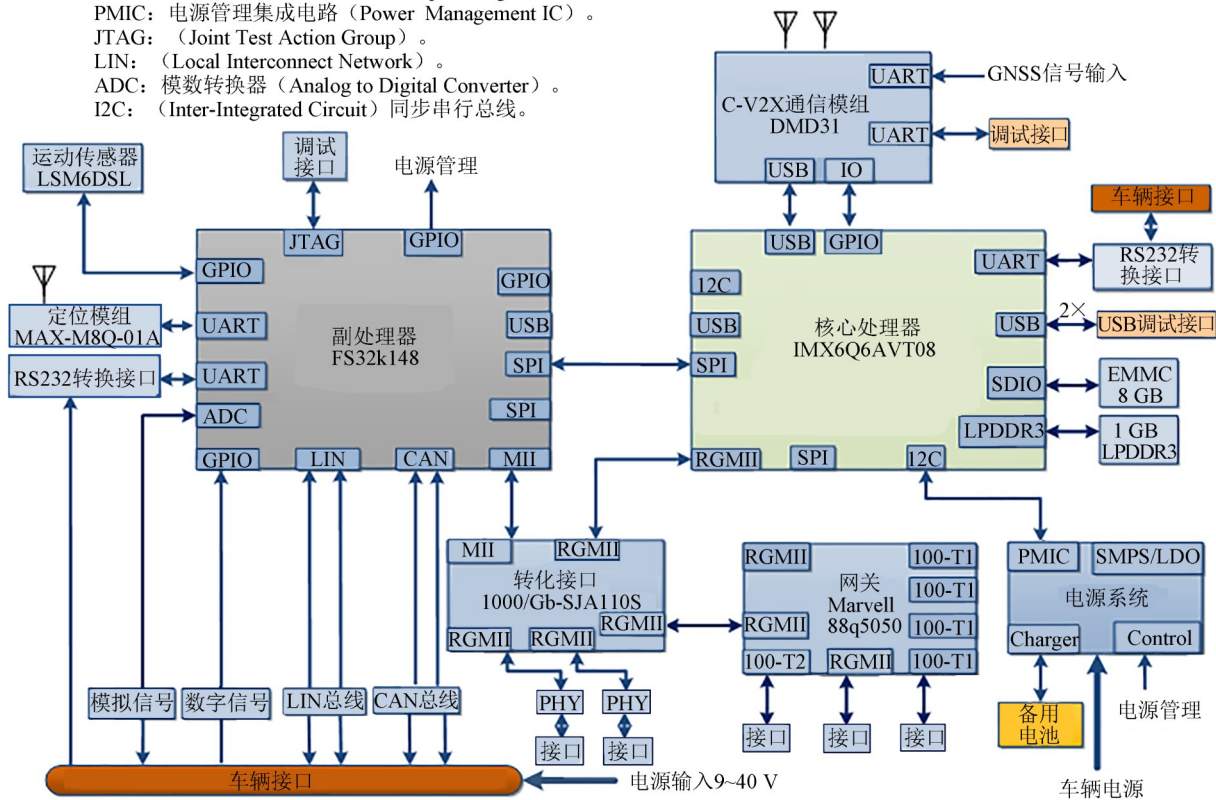


图 1 车载终端硬件架构

Fig. 1 Hardware architecture of vehicle terminal

者负责射频信号的发送和接收, 后者只接收。在实际移动通信系统中, 车辆在城市建筑群中移动时, 基站会将 2 个接口收到的射频信号合并, 从而获得分集增益, 提高多径衰落信道传输可靠性。

表 1 芯片 (模组) 型号		
Tab. 1 Chip (Module) Models		
型 号	类 别	功 能
IMX6Q6AVT08	主处理器	接收、处理 CAN/V2X 消息数据
FS32K148	副处理器	任务管理、休眠唤醒、电源管理等系统任务
DMD31	C-V2X 通信模组	提供 PC5 和 Uu 接口, 支持 V2X 消息数据的上传和下载
MAX-M8Q-01A	定位模组	北斗、GPS、GLONASS 的高精度定位
LSM6DSL	运动传感器	在三维空间中检测、追踪车辆的运动状态
88Q5050	网关	用于 2 个高层协议不同的网络互连, 可作为视频等信息的输入/输出端口

IMX6Q6AVT08 是核心处理单元, 内嵌式存储器 eMMC 的容量为 8 GB, 磁性随机存储器 MRAM 的容量为 1 MB, 可访问各个模组, 处理 CAN/LIN 总线的数据, 核心处理器和副处理器常规采用高速全双工同步的串行外设接口 (Serial Peripheral Interface, SPI) 通信方式。

FS32K148 是副处理器, 负责 OBU 模式管理, 通过点火信号、CAN/LIN 总线数据检测车辆状态, 与预设配置文件数据进行条件判断, 对电源管理模块进行响应控制, 实现各个模组休眠、关机或工作模式的切换。

3 软件系统

3.1 嵌入式底层

主处理器底层将剪裁的 Linux 系统移植到 RAM 9 结构微处理器, 采用交叉开发模式, 在 PC

端进行 Bootloader 的剪裁/移植、Linux 内核配置/编译/调试/剪裁/移植、根文件系统构建/移植。副处理器底层采用 FreeRTOS 操作系统, 设计定时器、消息队列、看门狗及驱动程序, 实现业务以及系统状态的控制、CAN 存储的应用逻辑处理及电源管理。

3.2 系统任务调度

系统初始化模块 (Scp) 负责在终端启动时完成驱动加载、数据初始化及启动主任务 (main-Task) 等功能, 如图 2 所示。

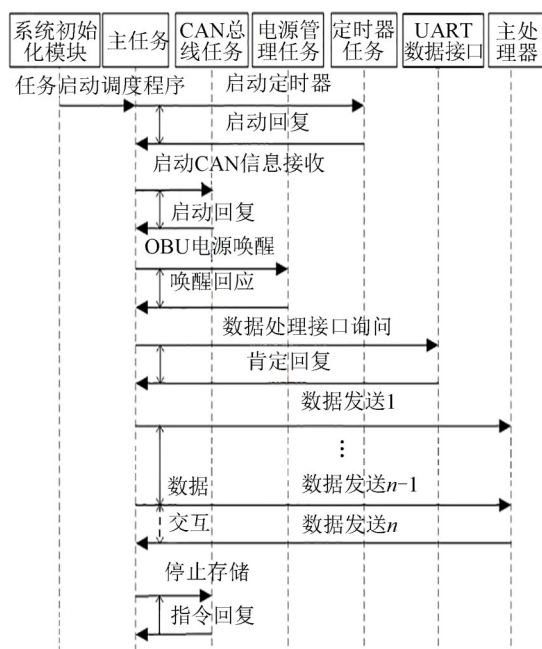


图 2 系统任务调度

Fig. 2 System task scheduling

主任务首先向定时器任务 (timer) 发送启动指令, timer 需在约定时间内回应, 表示定时器任务正常。Scp 启动意味着车辆 CAN 总线产生了数据流, mainTask 立即向 CAN 总线任务发送启动指令, 相应的副处理器初始化内存缓存, 清零相关指针, 开始接收数据并缓存数据。若内存溢出, 则将数据保存至 flash 中; 若 flash 缓存亦存满, 则开始循环覆盖。随后 mainTask 通过电源管理任务 (Power) 唤醒主处理器、C-V2X 通信模组及外围其他模组, 待所有任务上电并返回确认信号后, 向 UART 发送数据, 主处理器返回确认消息, 即可停止缓存 CAN 数据任务。

3.3 数据交互与广播

数据交互与广播功能包括数据通知、数据请求和数据应答, 如图 3 所示。

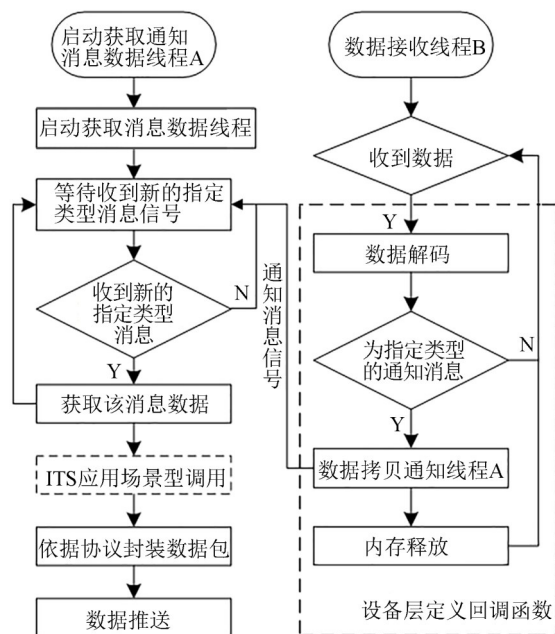


图 3 数据交互与广播流程

Fig. 3 Data interaction and broadcasting

(1) 数据通知执行接收数据线程, 执行设备功能层定义的回调函数, 对接收到的数据进行解码, 根据解码得到的消息体类型通知相应的消息通知线程, 进而在设备功能层获取到相应的消息体数据。

(2) 数据请求, 是在当前时间段内获取指定类型的某一条消息数据。

(3) 数据应答, 是返回消息请求指定的某种消息数据到设备功能层。

消息操作功能就是将本机的数据进行打包组帧传递给无线电通信子系统模块进行发送和对接收到的信息集进行解析。消息操作功能可以通过 GPS 定位系统、车辆 CAN 总线接口以及请求本机基本属性信息等功能, 获取本车所有必须的数据参数。

DMD31 与微处理器 (Micro Processor Unit, MPU) 通过 USB、基于远程网络驱动程序接口规范 (Remote Network Driver Interface Specification, RNDIS) 协议虚拟以太网口进行数据透传, 以用户数据报协议 (User Datagram Protocol, UDP) 方式通信。MPU 应用层通过既定协议向 DMD31 的 IP 地址和 PORT 发送数据, DMD31 接收数据, 经 PC5 对数据进行广播发送, 实现 V2V、V2I 的短距离通信; 与此相似, DMD31 接收到其他终端 (如 RSU 和其他车辆的 OBU) 数据时, 则向指定的 IP/端口进行主动推送, MPU 接收数据

并根据协议解析、处理。

具体实施过程采用函数 socket (PF_INET, SOCK_DGRAM, 0) 创建UDP套接字:

```
void msg_send_init ()
{
    g_dtv_l_addr.sin_family = AF_INET;
    g_dtv_l_addr.sin_addr.s_addr = inet_addr
("192.168.62.199");
    g_dtv_l_addr.sin_port = htons (30304);
    g_send_fd = socket (PF_INET, SOCK_
DGAM, 0);
    if (g_send_fd < 0)
    {
        perror ("create socket error!");
        abort ();
    }
}
```

其中: 函数 socket () 的参数 PF_INET 表示套接字的协议类型为 UDP 协议; 而 SOCK_DGRAM 表示 socket () 的套接字类型为数据报套接字。

网络通信接口参数设置见表 2。

表 2 网络通信接口参数
Tab. 2 Network communication interface parameters

接口协议	UDP
接口 IP(DMD31)	192.168.62.199
接口 PORT(DMD31)	30300
接口 IP(上位机)	192.168.62.224
接口 PORT(上位机)	30301

完成 OBU 网络通信初始化后, OBU 需要发送数据报文, 此时调用函数 msg_send () 收发数据报文:

```
void msg_send (const char* ptr, const int
len)
{
    assert (ptr != NULL);
    assert (len > 0);
    int slen = sendto (g_send_fd, ptr, len,
0, (struct sockaddr*) &g_dtv_l_addr, sizeof (g_dtv_l_addr));
    if (slen < 0)
    {
        perror ("socket send_to message body er-
```

```
ror!");
    }
    printf ("send data success, length:
%d\n", slen);
}
```

其中: 函数的参数值 g_send_fd 为套接字描述符, 参数值 ptr 为需要发送报文结构体标志。为保证通信性能, 单次发包大小小于 400 Bytes。

接收端则绑定上位机接口 UDP, 与发送端相似, 完成接收端初始化, 调用相同结构的 msg_rcv () 函数接收数据。当数据报文收发完毕, 调用 close (fd) 关闭套接字。

4 性能测试与评价

4.1 传导射频测试

传导射频测试在实验室进行, 系统搭建如图 4 所示。

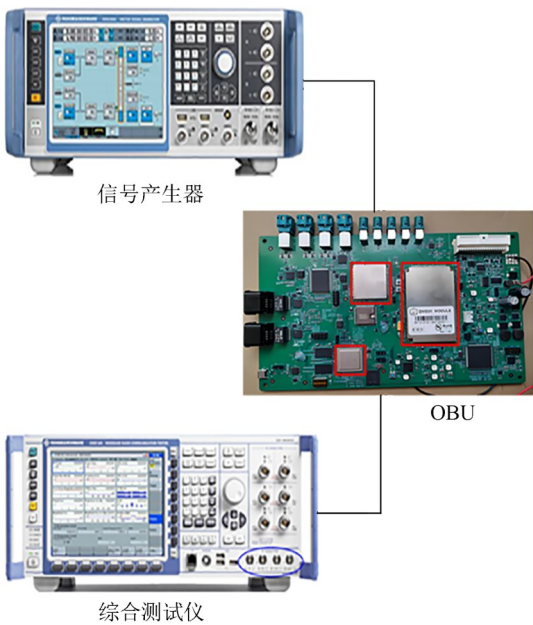


图 4 射频测试系统搭建
Fig. 4 RF test system

OBU 的电路板在制造时需为通信模组、核心处理器和副处理器加装无线屏蔽罩, 防止干扰磁场向外扩散, 以及屏蔽磁场的辐射干扰。信号产生器通过模拟一个全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 信号导入 OBU, 建立虚拟 OBU 与被测 OBU 的数据链路, 之后使用综合测试仪进行射频测试。测试开始时, 给 OBU 开发板上电, 此时用信号产生器设定

OBU 的模拟行驶路径定位数据集, 通过射频线直接发送给 OBU (实验室是密闭的屏蔽暗室, 通过外接天线发送到自由空间, 采用辐射的方式发送给 OBU), 查看定位模块是否接收到卫星定位数据, 确保定位模块完成时间同步以及 OBU 定位。在确保 GNSS 正常工作后使用物理层调试工具使 OBU 终端发送正弦信号, 同时综合测试仪的中心频率设置为 OBU 的工作频率, 调节发送信号功率使其工作在 Power Class3 最大输出功率状态下, 与 OBU 建立通信连接。传输过程中还需要调节综合测试仪以补充射频电缆的线损。

在射频测试系统通信建立连接完成后, 信号分析仪在通信过程中使用方均根值检波方式, 调节适当的分辨率带宽和显示带宽数值检测 OBU 的参数。

图 4 中, 设置 Res BW (分析仪分辨率带宽) = 150.00 kHz, Span (扫描宽度) = 15 MHz, Center (中心频率) = 5 910.00 MHz, 测得 Total Channel Power (信道功率) = 19.86 dBm, 标准^[9]要求发射功率为 23 dBm。Tolerance (容许度) 为 3.30 dB。发射功率低于 19.70 dBm 会降低 V2X 设备的信号覆盖范围; 而高于 26.30 dBm 会增加设备功耗、干扰其他设备、降低信噪比, 导致出现通信距离变近、性能变差的现象。

对本文车载终端性能的测试结果如图 5 和图 6 所示。

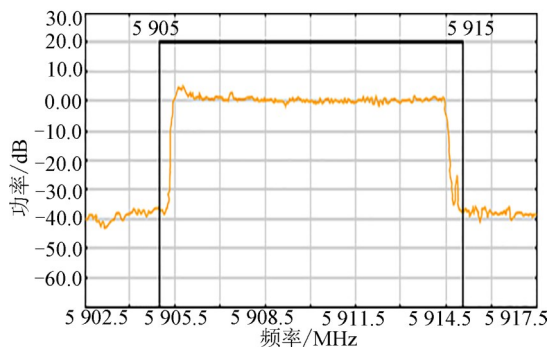


图 5 发射功率测试结果

Fig. 5 Transmission power

为合理使用频谱资源, 第 3 代合作伙伴计划 (The 3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 标准^[9]要求 C-V2X Band47 的频率范围为 5 905~5 925 MHz。由图 6 可知, 测试结果为 Center (中心频率) = 5 910 MHz, Occupied Bandwidth (占用带宽) = 8.939 3 MHz。表明本文 C-V2X 终端的通信频率范围在 5 905.53~5 914.47 MHz, 满足标

准的要求。

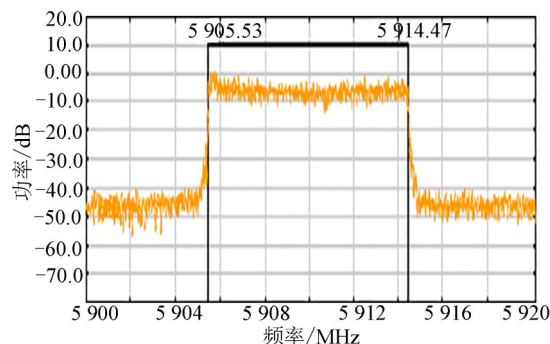


图 6 频谱带宽测试结果

Fig. 6 Spectral bandwidth

4.2 通信性能测试

通信性能测试环境如图 7 所示。实验在中国汽车技术研究中心的封闭园区进行, 十字路口周围为树林, 天气晴, 无干扰车辆和行人。V2V 场景测试系统由测试车、OBU (C-V2X 收发包测试软件、数据存储单元)、OBU 外置天线组成, 采取被动测量的方式, 发送方与接收方均需 GNSS 校时, 保证两终端时间戳一致。通过载有 OBU 的 2 辆测试车在同一直道 (图 7 中红车和黄车) 或交叉道 (图 7 中红车和蓝车) 保持一定的距离静止, 记录丢包率和时延, 可检测车载终端在静态场景的通信性能; 而当某一辆车保持静止, 另一辆车以一定的速度从直道或交叉道接近时, 可检测动态场景通信性能。

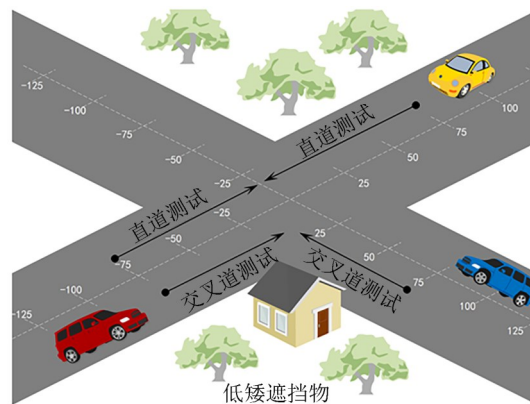


图 7 通信性能测试环境 (单位: m)

Fig. 7 Test environment of communication performance (Unit: m)

4.2.1 静态场景通信性能测试

直道测试和交叉道 V2V 测试时, 设置两车距离分别为 50 m、100 m、150 m 和 200 m, 直道中红、黄两车相互可视, 交叉道中红、蓝两车直线

距离上存在植被遮挡物。实验开始时, 启动OBU电源模块、定位模块和日志模块, 启动通信业务和设备控制业务, 完成联网、时间同步, 打开测试软件定点记录实验数据, 注意在点位移动时停止记录。

V2X的基本服务共27例, 每个服务都规定了消息的频率, 最小频率要求是每秒1条消息, 而最大频率要求是每秒10条消息^[10], 消息实际发送频率会略高于应用所需频率阈值, 要求V2X终端在通信范围内的丢包率小于5%。静态场景的通信性能测试结果如图8所示。

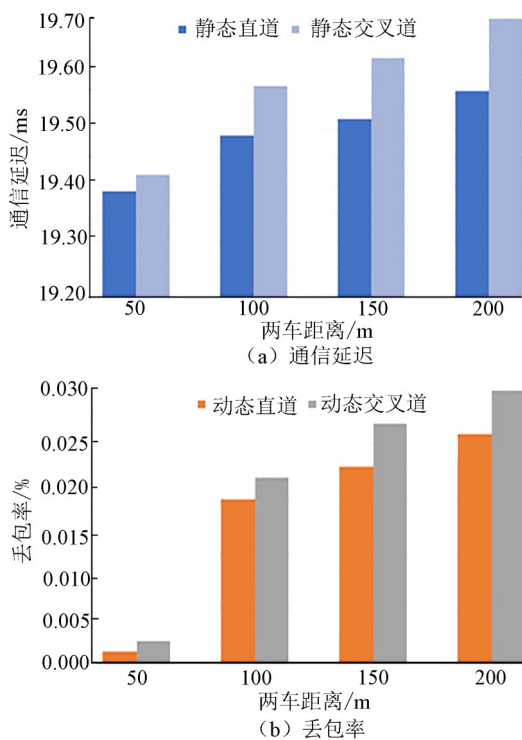


图8 静态场景通信性能测试结果

Fig. 8 Communication performance in static scenarios

可知, 本次实验中, 两车距离50 m处丢包率接近于0, 在两车距离100~200 m时的丢包率仍维持在0.02%~0.03%。交叉道上, 由于中间存在遮挡物, 丢包率略高, 但仍然优于标准要求。同时, 要求V2I、V2P通信时延需低于100 ms, 实验结果显示两车距离0~200 m内设备之间的平均通信时延由19.4 ms逐渐升高至19.7 ms, 满足ITS场景用例的通信要求。

4.2.2 动态场景通信性能测试

直道测试时, 红车在-100 m处静止, 黄车在100 m处以车速10 km/h相向而行; 交叉道测试时, 红车在-50 m处静止, 蓝色车由193.65 m处以10

km/h向十字路口方向行驶。测试区间选取两车的直线距离为50~100 m、100~150 m、150~200 m。交叉道测试时, 蓝色车所在道路的坐标为0~86.60 m、86.60~141.42 m、141.42~193.65 m。实验数据如图9所示。

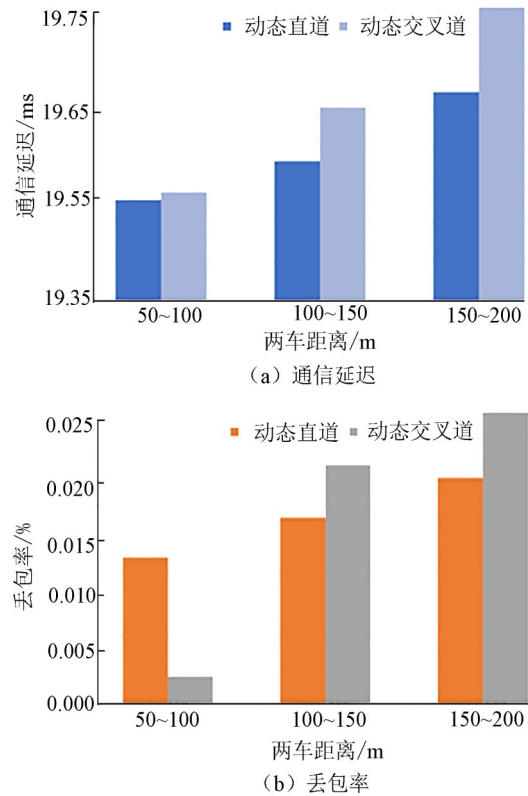


图9 动态场景通信性能测试结果

Fig. 9 Communication performance in dynamic scenarios

对于十字路口相向行驶的两辆车, 通信距离最小保持在200 m以内, 标准^[9]要求V2V紧急场景的通信延迟低于20 ms (如碰撞预警)。文献[11]中, 距离为0~25 m、25~50 m、50~75 m、75~100 m、100~125 m时的丢包率分别为0.50%、0.26%、0、0、1.92%, 平均通信时延20.07 ms; 本文实验数据与其对比显示距离为50~100 m时的通信丢包率较高, 其他距离段的丢包率较低, 尤其是大于100 m后仍能保持低丢包率。另外, 本文设备的通信时延为19.5~19.8 ms, 优于文献[11]的设备表现。

5 结论

本文基于C-V2X技术设计了智能运输系统的车载终端, 完成了DMD31与主、副处理器结合的

软硬件设计, 通过性能测试与试验评价, 主要得到以下结论:

(1) 该车载终端满足 ITS 的功能需求, 具有架构合理、高效节能、性能稳定等特点;

(2) 主天线和分集天线增益设计、任务调度与数据交互设计合理有效, 终端接收、处理和发送数据即时可靠, 实现了低延迟、低丢包的近场通信;

(3) 终端性能满足标准^[9]要求, 与文献相比, 平均通信时延降低了 0.4 ms, 大于 100 m 后的丢包率降低了 1.8%。

参考文献:

- [1] LIN S C, CHEN K C, KARIMODDINI A. SD-VEC: Software-defined vehicular edge computing with ultra-low latency[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(12): 66-72.
- [2] KIELA K, BARZDENAS V, JURGO M, et al. Review of V2X IoT standards and frameworks for ITS applications[J]. Applied Sciences, 2020, 10(12): 4314-4337.
- [3] MUTHANNA A, SHAMILOVA R, ATEYA A A, et al. A mobile edge computing/software-defined networking-enabled architecture for vehicular networks[J]. Internet Technology Letters, 2020, 3(6).
- [4] 张孝兵, 周宣赤, 郑农, 等. 基于 V2X 无线通信的车载智能终端装置: CN106773968A[P]. 2017-05-31.
- [5] 邢珺, 魏乐宇, 陆捷, 等. 一种融合 ETC 和 V2X 功能的智能车载终端 OBU 及应用: CN114120460A[P]. 2022-03-01.
- [6] ZADOBRISCHI E, DIMIAN M H, NEGRU M. The utility of DSRC and V2X in road safety applications and intelligent parking: Similarities, differences, and the future of vehicular communication[J]. Sensors, 2021, 21(21): 7237-7275.
- [7] MIAO L L, VIRTUSIO J J, HUA K L. PC5-based cellular-V2X evolution and deployment[J]. Sensors, 2021, 21(3): 843-857.
- [8] 中国国家标准化管理委员会. 合作式智能运输系统专用短程通信 第 4 部分: 设备应用规范: GB/T 31024.4—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [9] The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 36.521: Technical specification on LTE-evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) (Release 15): 3GPPTS 36.521 [S]. 2018.
- [10] KHAN M J, KHAN M A, BEG A, et al. An overview of the 3GPP identified use cases for V2X services[J]. Procedia Computer Science, 2022, 198(C): 750-756.
- [11] 徐娅琪. 十字路口 V2X 通信性能分析和测试研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022: 46-56.

XU Y Q. Analysis and tests of V2X communication performance at intersections scene[D]. Changchun: Jilin University, 2022: 46-56.