

C-V2X 大规模终端通信测试报告

2021. 7

目 录

1. 简介.....	1
2. 测试环境.....	2
2.1. 场地环境	2
2.2. 设备部署	2
2.2.1. OBU 部署	2
2.2.2. RSU 部署	3
2.2.3. 设备摆放	3
3. 测试参数配置.....	6
3.1. 接入层参数	6
3.1.1. 发射功率	6
3.1.2. 信道配置	6
3.2. 网络层参数	6
3.3. 应用层参数	6
3.3.1. 消息格式	6
3.3.2. 消息大小与频率	6
3.3.3. 消息发送方式	6
3.3.4. 应用层拥塞控制	7
3.4. 通信安全参数	7
3.5. 其他参数	7
4. 测试指标.....	8
4.1. 信道繁忙率 (CBR: Channel Busy Ratio)	8
4.2. 时延 (Delay).....	8
4.3. 丢包率 (PER: Packet Error Ratio)	8
4.4. 发包间隔 (ITT: Inter-Transmit Time)	9
4.5. 收包间隔 (IPG: Inter-Packet Gap)	9
4.6. 消息生存周期 (IA: Information Age)	9
4.7. 位置跟踪误差 (TE: Tracking Error)	9
5. 测试项目	10
6. 测试结果分析.....	11
6.1. 车辆密度对通信性能的影响对比	11
6.1.1. 信道繁忙率 CBR	11
6.1.2. 发包间隔 ITT	11
6.1.3. 丢包率 PER	12
6.1.4. 时延 Delay	12
6.1.5. 小结	13
6.2. 交叉路口 OBU 间通信测试	13
6.2.1. 信道繁忙率 CBR	14
6.2.2. 发包间隔 ITT	15
6.2.3. 时延 Delay	16

6.2.4.	丢包率 PER.....	16
6.2.5.	小结	18
6.3.	直行道路 OBU 间通信测试.....	19
6.3.1.	信道繁忙率 CBR	19
6.3.2.	发包间隔 ITT	20
6.3.3.	丢包率 PER.....	20
6.3.4.	时延 Delay.....	22
6.3.5.	小结	22
6.4.	拥塞控制算法对通信性能的影响对比	23
6.4.1.	信道繁忙率 CBR	23
6.4.2.	发包间隔 ITT	23
6.4.3.	丢包率 PER.....	24
6.4.4.	时延 Delay.....	24
6.4.5.	信息生存周期 IA (100ms 周期计算)	25
6.4.6.	小结	25
6.5.	直行道路移动车辆通信测试	26
6.5.1.	单移动车通过直行道路	26
6.5.2.	双移动车通过直行道路	27
6.5.3.	小结	29
6.6.	交叉路口 OBU 与 RSU 间通信测试.....	30
6.6.1.	丢包率 PER.....	31
6.6.2.	小结	32
6.7.	直行道路 OBU 与 RSU 间通信测试.....	32
6.7.1.	丢包率 PER.....	34
6.7.2.	时延 Delay.....	35
6.7.3.	小结	36
6.8.	资源池配置对通信性能的影响对比	36
6.8.1.	信道繁忙率 CBR	36
6.8.2.	发包间隔 ITT	36
6.8.3.	丢包率 PER.....	37
6.8.4.	时延 Delay.....	39
6.8.5.	小结	41
7.	总结.....	42
	参考文献.....	43
	致谢.....	44

前言

随着 C-V2X 技术的不断发展，标准体系的不断完善，车联网行业进入了关键的商业化落地阶段。但是在真实交通环境下大规模实际应用之前，依然还有许多问题尚未解决，其中，基于真实交通场景下的大规模终端设备的通信性能测试，依然是比较空白的状态，亟需一套完善的方案进行测试与研究。

业界从 2019 年底到 2020 年 10 月，先后进行仿真测试、实验室内场测试和外场测试。共同探究基于 LTE-V2X 的大规模终端设备在真实环境下的通信情况，并向行业发布测试研究报告，为行业提供参考依据，推动车联网产业向前发展。

1. 简介

C-V2X 大规模测试的目的旨在测试验证真实交通场景下 LTE-V2X 在不同的参数配置下的大规模通信性能，测试验证已有的标准体系及技术规范，测试探究未定的技术参数对测试结果的影响。希望能够通过本次测试的结果反映出的问题，指导今后工作的发展，为标准的制定提供依据，推动整体行业的进步，促进行业标准的完善。

本次大规模测试中包括两种典型的交通环境，交叉路口场景和直行道路场景，以探究真实的交通拥挤环境中，车辆间 BSM 消息的通信性能。为了探究现行拥塞控制算法、不同资源池分配策略（10MHz+10MHz 双资源池和 20MHz 单资源池）对通信表现的影响，本文的后续章节将给出对比测试的结果和分析，为算法的优化和信道设计提供数据参考。车辆密度的变化也在本报告的结论之内，为现有 LTE-V2X 通信容量的考察提供依据。路侧设施单元（RSU）覆盖性能的测试也包括在内，RSU 和 OBU 使用 10MHz+10MHz 双资源池、RSU 和 OBU 混用 20MHz 单资源池的对比可以为 V2X 的资源池划分标准讨论作为指导。此外，本次测试对移动车辆参与交通的场景进行了简单测试，并给出了初步结论，为之后更多的测试场景打下基础。

2. 测试环境

2.1. 场地环境

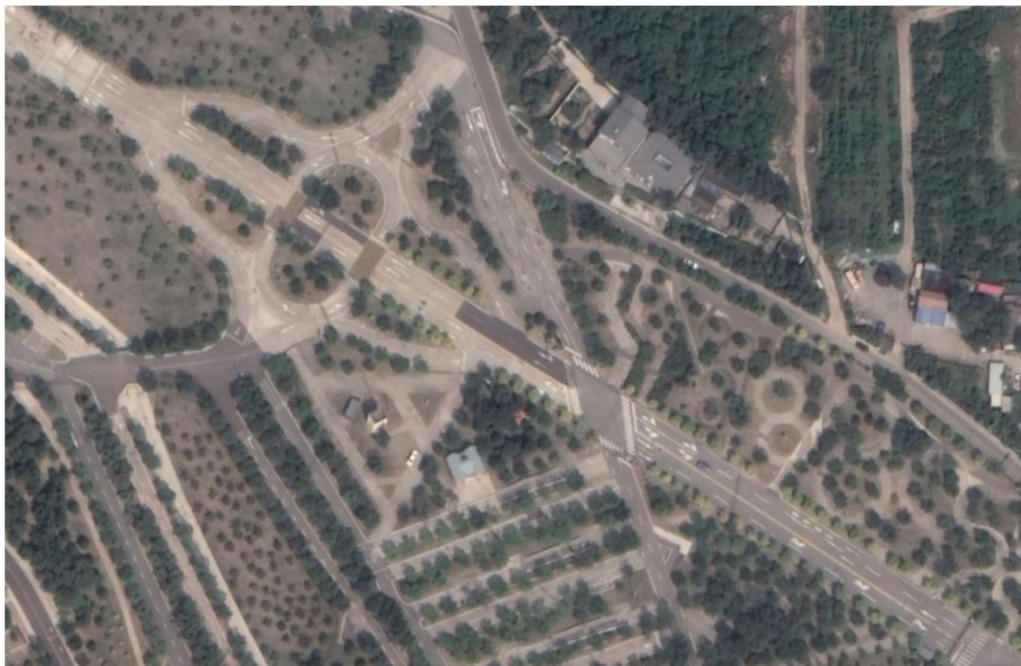


图 1：国家智能汽车与智慧交通（京冀）示范区海淀基地

京冀示范区拥有全球第 1 条 V2X 潮汐开放试验道路，占地面积 850 亩，道路规模为 800Km，测试场地提供典型的交通环境：直行道路和交叉路口，支持真实交通场景下（高速+城市+郊区）的 C-V2X 大规模测试。在测试道路两旁，架设高架杆和交通指挥灯，可用于装配 RSU 设备。

2.2. 设备部署

2.2.1. OBU 部署

在大规模测试的外场测试中，使用 202 台 OBU 设备进行测试。其中，198 台 OBU 设备部署在 6 爪平板车上，每个平板车搭载 6 台设备，每台 OBU 设备可以通过 4G 信号连接云端控制平台，由星云 C-V2X 规模化测试系统监控 OBU 设备运行状态，并远程下发测试命令。测试结束后，通过平板车上的管理终端在本地回收测试 log。平板车共计 33 台，静止摆放在测试场地中。剩下 4 台 OBU 设备用于移动车参与交通的场景。

OBU 设备装配在 6 爪平板车上的效果如图 2 所示，设备主体装载在平板车下方的机箱中，采用移动电源供电或路侧固定电源供电。设备连接四合一组合天线，支持 LTE-V2X 全频段发送，相邻两个天线之间间隔至少 1 米。平板车装配两排天线架，每排天线架安装 3 台同模组 OBU，两排天线架即三台模组 A 设备，三台模组 B 设备，共计六台 OBU 设备，用以模拟双车道上的 6 辆车。

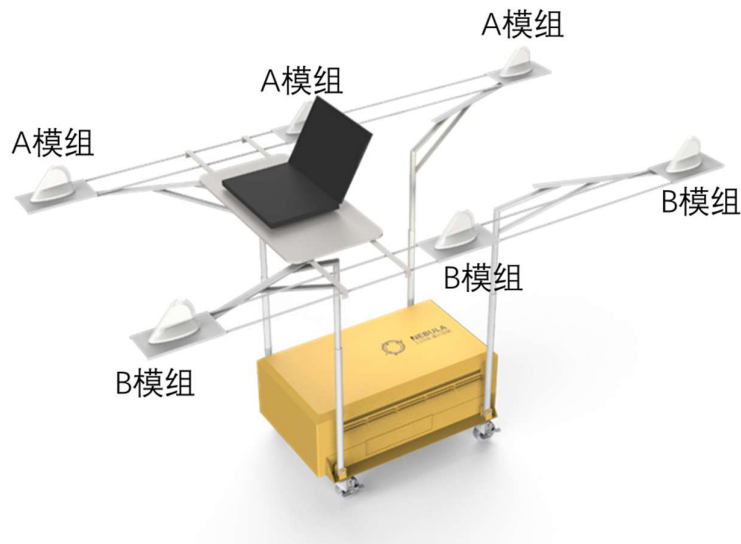


图 2：测试车 OBU 装配图

2.2.2. RSU 部署

在大规模测试的外场测试中，总共使用 2 台 RSU 设备进行测试。RSU 设备部署在路测设施的顶端，每台设备连接全向玻璃钢天线，具有较好的方向覆盖性。为了模拟真实交通中 RSU 的架设，测试中分别进行单 RSU 部署和双 RSU 部署，讨论在周围环境（树木、房屋）干扰下对 RSU 覆盖性能的对比。

2.2.3. 设备摆放

测试车摆放在测试道路上，静止不动，每台测试车间距为 10 米，模拟真实交通中车辆所占的区域。测试车总计 33 台，编号依次为 1 号至 33 号。直行路段和交叉路口测试车的摆放示意如图 3 和图 4 所示。

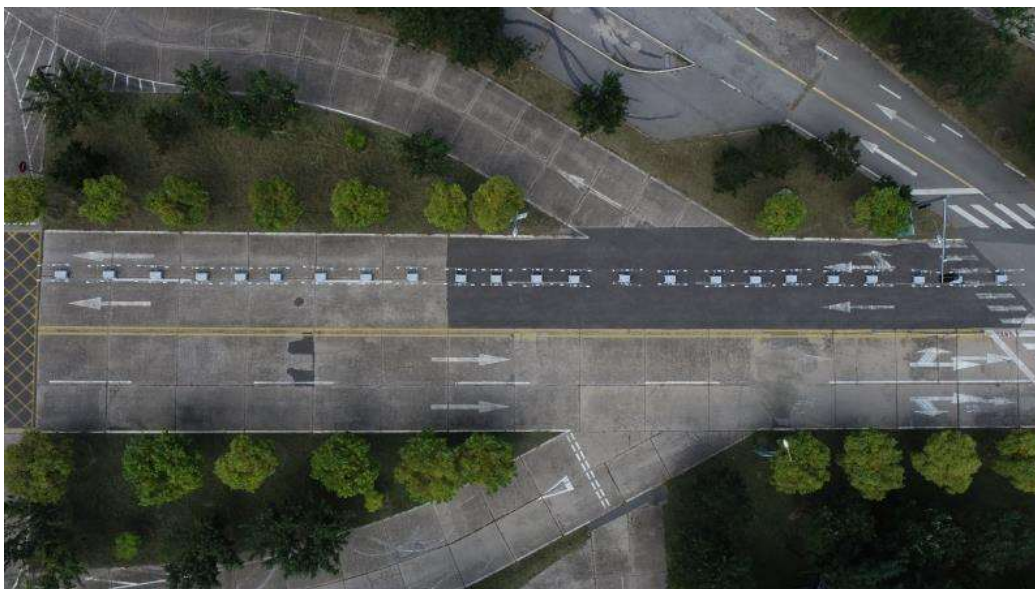


图 3：直行道路测试车摆放示意图



图 4：交叉路口测试车摆放示意图

移动车测试过程中，在直行道路摆放全部静止测试车作为背景车，形成道路拥挤区域，移动车辆以不同的速度行驶经过拥挤路段。

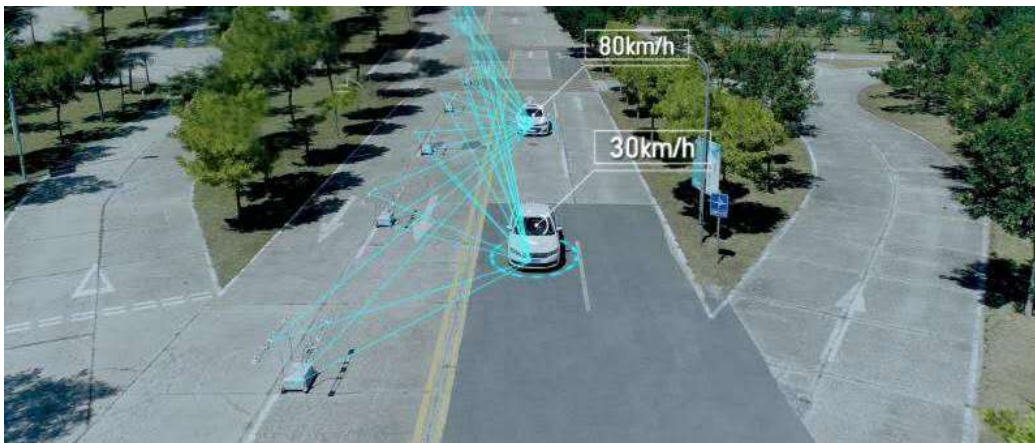


图 5：移动车测试场景

RSU 设备装配在路测设施顶端，接近真实道路中 RSU 的部署：



图 6: RSU 部署

3. 测试参数配置

测试过程中涉及到的参数主要分为四部分：接入层参数、应用层参数、通信安全参数以及其他参数。其中已有标准明确规范的参数，在本次测试中不做更改，遵循标准的规定进行配置，其余参数按照具体测试项目需求进行配置。

3.1. 接入层参数

3.1.1. 发射功率

- OBU 发射功率：23dBm
- RSU 发射功率：23dBm

3.1.2. 信道配置

- Case 1：5905-5925 频段，OBU 与 RSU 共用 20MHz 信道；
- Case 2：OBU 使用 5905-5915 频段的 10MHz 信道，RSU 使用 5915-5925 频段的 10MHz 信道；

3.2. 网络层参数

网络层实现遵循《基于 LTE 的车联网无线通信技术 网络层技术要求》。

3.3. 应用层参数

3.3.1. 消息格式

OBU 与 RSU 按照自定义格式发送大规模测试消息。其中，OBU 仅发送一种字节长度固定的消息，模拟真实场景下的 BSM 发送过程。RSU 发送 4 种不同字节长度的消息，模拟真实场景下 RSU 发送 RSM、RSI、SPAT、MAP 四种消息的过程。

3.3.2. 消息大小与频率

OBU 发送的数据包大小与频率：

- 300 字节（10hz）：模拟 OBU 周期发送 BSM 消息。
- 450 字节（触发式）：模拟 OBU 发送关键事件的 BSM 消息。

RSU 发送的数据包大小：

- 350 字节（2hz）：模拟 RSU 周期发送 SPAT 消息。
- 600 字节（10hz）：模拟 RSU 周期发送 RSM 消息。
- 1000 字节（2hz）：模拟 RSU 周期发送半静态 RSI 消息。
- 1300 字节（1hz）：模拟 RSU 周期发送 MAP 消息。

注：由于本次测试采用自定义消息格式模拟真实场景下发送 BSM、RSM、RSI、SPAT、MAP 五种消息，因此消息的大小依据经验值设定，采用固定字节长度，并附加上编码后的安全证书大小。

3.3.3. 消息发送方式

OBU 消息发送方式遵循《基于 LTE-V2X 直连通信的车载信息交互系统技术要

求》。

RSU 消息发送方式遵循《基于 LTE 的车联网无线通信技术 直连通信系统路侧单元技术要求》标准的最新版本要求。

在 C-V2X 大规模测试中：

OBU 采用 SPS 方式发送 300 字节消息，优先级为 5。采用 event 发送关键事件消息，优先级为 2。

RSU 采用 event 方式周期发送四种消息。对于 350 字节消息，优先级为 3。对于 600 字节消息，优先级为 5。对于 1000 字节消息，优先级为 6。对于 1300 字节消息，优先级为 8。

注：由于“直连通信系统路侧单元技术要求”标准还处于征求意见中，本测试参考的标准版本与现行版本可能不一致。在大规模测试中 RSU 的发包方式全部采用 event 方式。

3.3.4. 应用层拥塞控制

- Case 1：不做拥塞控制
- Case 2：遵循《基于 LTE-V2X 直连通信的车载信息交互系统技术要求》附录 E.3 基于车辆密度的拥塞控制方法。

3.4. 通信安全参数

本次测试主要针对的是大规模下终端通信性能的测试，而现阶段的消息安全验证策略主要体现为空口数据包大小增大，其主要影响为应用层时延增大，因此我们将通信安全的参数转化为应用层数据包的大小。在现阶段的测试中暂不对通信安全方面进行更多配置，留在下一阶段的测试中进行。

3.5. 其他参数

车辆密度：直行道路场景下，相同摆放方式，同时开启 200 台终端/100 台终端/50 台终端，模拟不同的车辆拥塞程度。

4. 测试指标

4.1. 信道繁忙率（CBR: Channel Busy Ratio）

根据 CCSA 行标《基于 LTE 的车联网无线通信技术 空中接口技术要求》定义，CBR 为：对 PSSCH 信道，资源池内，通过在子帧[n-100, n-1]上感知，UE 测量的 S-RSSI 超过某个（预）配置门限的子信道比例；对 PSCCH 信道，在 PSCCH（预）配置为与 PSSCH 在非相邻的资源块上发送的资源池内，通过在子帧[n-100, n-1]上感知，UE 测量的 S-RSSI 超过某个（预）配置门限的 PSCCH 资源池资源的比例，并假定 PSCCH 资源池由频域大小为 2 个连续 PRB 对的资源组成。

4.2. 时延（Delay）

从设备 A 的应用程序将应用层数据包（例如 BSM）传递到较低层的时间点到设备 B 从较低层接收到传递给应用程序的应用层数据包的时间点之间的时间间隔（以毫秒为单位）。

统计时假设往返传输时延相同，设备 A、B 之间的平均时延计算步骤如下：

1. 查询并记录 B 的收 log 中，来自 A 的数据包 n 的发送时间 T1 与接收时间 T2。
2. 查询并记录 A 的收 log 中，来自于 B 的数据包 m 的发送时间 T3 与接收时间 T4。其中，T3 必须大于 T2（通常 T3 为大于 T2 的第一个值）。
3. 根据公式 $t = ((T4 - T1) - (T3 - T2)) / 2$ 计算 AB 间的平均传输时延。

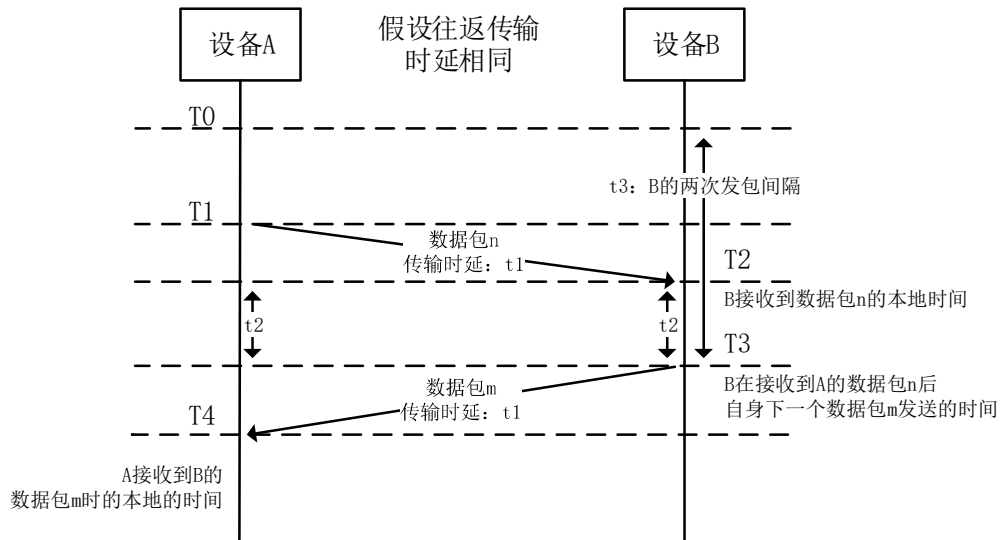


图 7：时延计算方法

一般来说，LTE-V2X 的端到端时延，与接入层的参数配置、拥塞状况、调度算法密切相关，最终体现的端到端时延是在平衡丢包、时延、接入数、数据包大小等一系列 QoS 指标的条件下确定的。对于 LTE-V2X 现阶段的应用需求，我们认为一般情况下 100ms 以内，均为符合要求的值。

4.3. 丢包率（PER: Packet Error Ratio）

单一丢包率：设备 A 向设备 B 发送数据时，设备 B 接收设备 A 发送的数据中丢失的数据量占设备 A 所发送数据总量的比率。

接收丢包率：设备 A 接收其他设备数据时的单一丢包率的平均值，记为设备 A 的接收丢包率。

发送丢包率：其他设备接收设备 A 发送数据时单一丢包率的平均值，记为设备 A 的发送丢包率。

100 米范围丢包率：考虑到实际行驶中，车辆通信 100 米范围内的通信较为关键，信息关系较为密切，测试中更关注 100 米内的通信情况。这里，规定 100 米范围内的设备向设备 A 发送数据时，设备 A 接收规定范围内所有设备的接收丢包率，记为设备 A 的 100 米通信范围丢包率。

4.4. 发包间隔（ITT: Inter-Transmit Time）

设备 A 接收设备 B 数据时，设备 B 连续发送数据包的包间时间间隔。

4.5. 收包间隔（IPG: Inter-Packet Gap）

设备 A 接收设备 B 数据时，连续相邻两个数据包的包间时间间隔。

4.6. 消息生存周期（IA: Information Age）

设备 A 接收设备 B 数据时，接收端当前的时间与最近收到的数据包中包含的 GPS fix 时间之差。

4.7. 位置跟踪误差（TE: Tracking Error）

设备 A 的实际位置和设备 B 推算出来的设备 A 的位置差。

5. 测试项目

外场测试根据测试计划依次进行大规模 C-V2X 测试各项目用例。

表 1：外场测试项目及参数配置：

编号	测试项目
1.	交叉路口，OBU 与 OBU，10M，无拥塞
2.	交叉路口，OBU 与 OBU，10M，有拥塞
3.	交叉路口，OBU 与 OBU，20M，无拥塞
4.	交叉路口，OBU 与 OBU，20M，有拥塞
5.	交叉路口，OBU 与单路口 RSU，10M，有拥塞
6.	交叉路口，OBU 与双路口 RSU，10M，有拥塞
7.	交叉路口，OBU 与双路口 RSU，10M，无拥塞
8.	交叉路口，OBU 与双路口 RSU，20M，有拥塞
9.	直行道路，OBU 与道路中间单 RSU，10M，有拥塞
10.	直行道路，OBU 与道路中间单 RSU，20M，有拥塞
11.	直行道路，OBU 与道路两端 RSU，10M，有拥塞
12.	直行道路，OBU 与道路两端 RSU，20M，有拥塞
13.	直行道路，OBU 与 OBU，10M，有拥塞
14.	直行道路，OBU 与 OBU，10M，无拥塞
15.	直行道路，OBU 与 OBU，20M，有拥塞
16.	直行道路，OBU 与 OBU，20M，无拥塞
17.	直行道路，单移动车，10M，有拥塞，30km/h
18.	直行道路，单移动车，10M，有拥塞，60km/h
19.	直行道路，双移动车，10M，有拥塞，30km/h，20%概率触发 event
20.	直行道路，总数一半 OBU 参与测试，10M，有拥塞
21.	直行道路，总数一半 OBU 参与测试，10M，无拥塞
22.	直行道路，总数四分之一 OBU 参与测试，10M，有拥塞
23.	直行道路，总数四分之一 OBU 参与测试，10M，无拥塞

6. 测试结果分析

选取基于真实场景参数配置的情况下的测试结果进行分析。

在当前的网联示范应用中，通常 OBU 设备在 5905-5915MHz 共 10MHz 的资源池发送消息，RSU 设备在 5915-5925MHz 共 10M 的资源池发送消息，应用层拥塞控制算法应当保持常开的状态。因此，在对以上测试项目进行分析时，我们将以典型 case 进行测试指标的分析。

在为期 2 周的测试中，共收集了 11000 份测试日志，总计超过 200GB 的数据文件。通过后续数据处理和计算，总结得到以下结果。

6.1. 车辆密度对通信性能的影响对比

测试目的：

探究不同车辆密度下，OBU 设备之间通信性能的变化。

测试用例：

10MHz+10MHz 双资源池，开启拥塞控制，直路道路场景，测试车摆放位置不变。

case1: 198 台设备全部开启（所有测试车）

case2: 开启 102 台设备（不改变整体测试车的摆放，均匀地开启设备）

case3: 开启 54 台设备（不改变整体测试车的摆放，均匀地开启设备）

6.1.1. 信道繁忙率 CBR

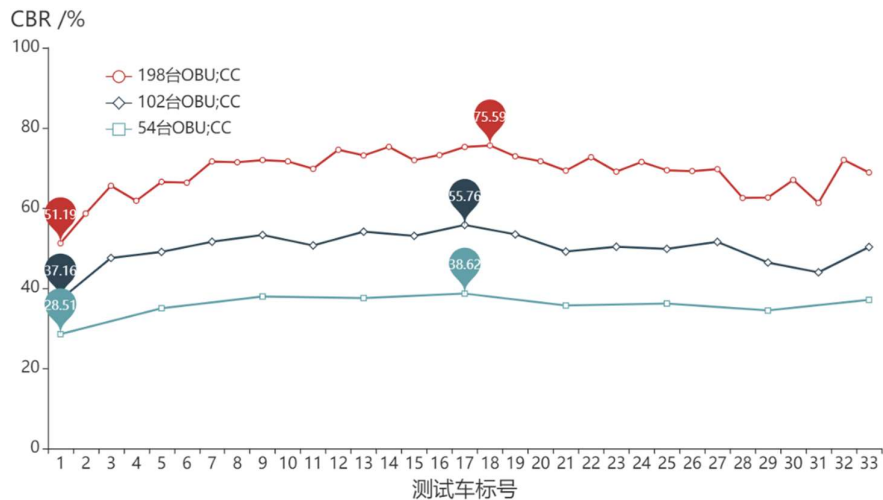


图 8：测试车监听信道的平均 CBR（标记点为最大最小值）

10M 信道配置，开启拥塞控制的 case 下，开启全部测试车，在车辆拥挤程度最高处（约 110 台 OBU，半径 100 米范围内），CBR 最高可达 76%。车辆密度逐渐减小时，车辆拥挤程度最高处（约 60 台 OBU，半径 100 米范围内）和（约 30 台 OBU，半径 100 米范围内），CBR 逐渐降低为 55.7%和 38.6%。显然，随着车辆密度的降低，对物理资源块的需求降低，CBR 逐渐降低。

6.1.2. 发包间隔 ITT

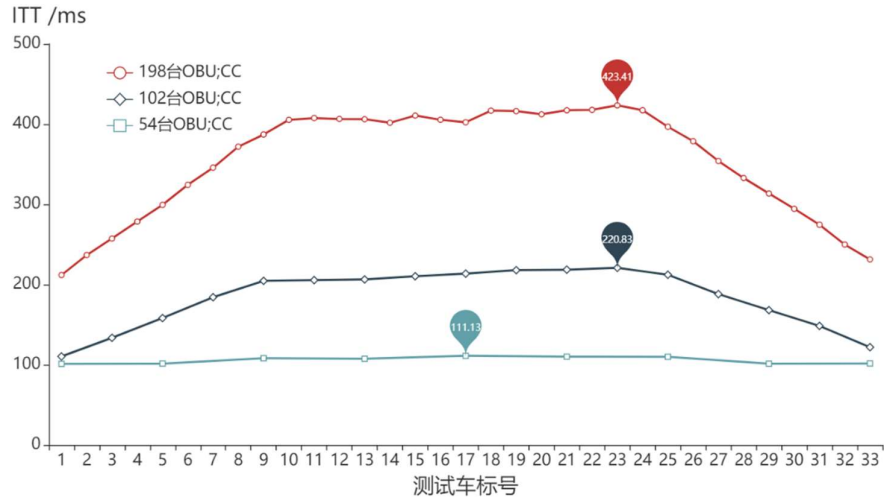


图 9：测试车的平均发包间隔（标记点为不同密度的最大值）

受到拥塞控制算法影响，OBU 设备密度较高处，设备发包间隔增加。结果显示，拥塞控制算法表现良好。在全部设备参与测试时，道路中间拥挤路段（约 110 台 OBU 设备，100 米半径范围）的测试车，发包间隔最高达到 423.4ms，符合拥塞控制算法计算的结果。

6.1.3. 丢包率 PER

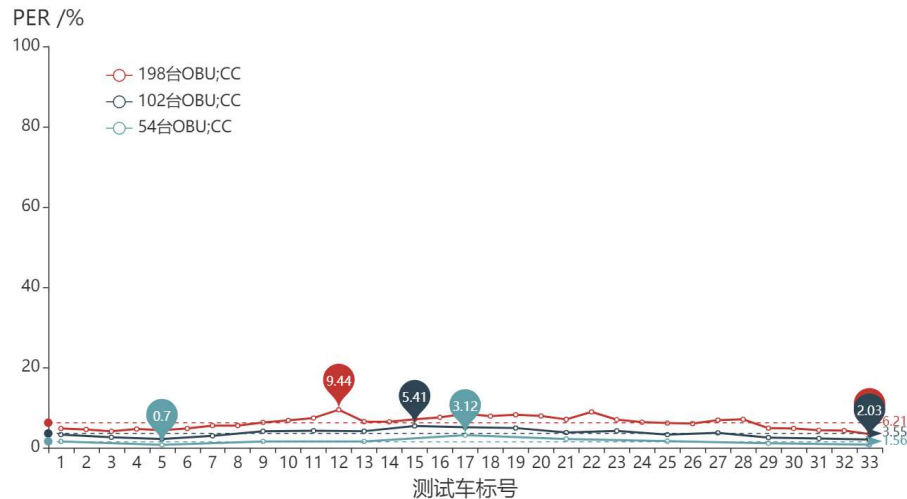


图 10：测试车通信范围 100 米内数据包的平均接收丢包率（标注点为不同密度的最大值与最小值）

在 100 米（半径）通信范围内，OBU 设备数为 18 左右时，OBU 接收范围内其他 OBU 发送数据包的丢包率最低达到 0.7%，在最拥挤路段，丢包率最高为 3.12%；而测试中拥挤程度最高时，100 米通信范围内的 OBU 设备数可达到 110 台左右，OBU 接收范围内其他 OBU 发送数据包的丢包率最高可到 9.44%。

6.1.4. 时延 Delay

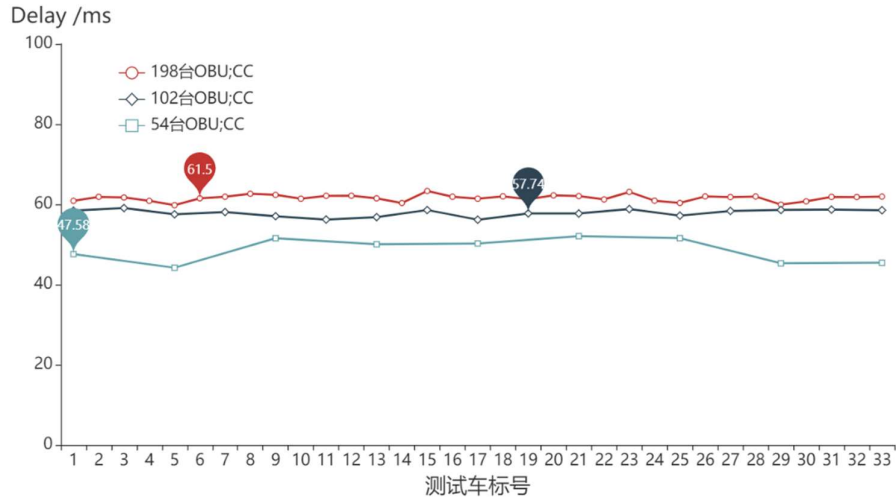


图 11: 测试车的平均传输时延

三种不同密度下, 平均传输时延, 随着 OBU 设备密度减小而降低, 但降低幅度不大, 相差约 10ms 左右。在高密度时, CBR 较高, OBU 设备在底层通信时受到拥塞控制的影响, 会在较大范围内选择通信资源, 以避免资源块的使用冲突, 资源调度时间的增加, 提高了 OBU 设备应用层之间的传输时延。而在低密度情况下, CBR 未达到限值阈值, OBU 设备则可以快速的选择资源。

6.1.5. 小结

对于直行道路拥挤路段, 车辆密度的变化对于 OBU 设备间通信性能的影响非常明显。测试中最拥堵场景下, 中间路段 100 米半径通信范围内约有 110 台 OBU 设备 (case1) 开启, 依次减少为 55 台左右 OBU 设备 (case2) 开启, 27 台左右 OBU 设备 (case3) 开启, 监听信道的 CBR 依次为 75.6%, 55.7%, 38.6%, 随着车辆密度的降低, 物理资源块的竞争得到缓解, CBR 降低; 来自空口的数据被成功接收的概率也相应提高, 数据包的传输成功率得到改善, 丢包率从 9.44% (case1) 依次减少为 5.41% (case2), 3.12% (case3)。实际场景中, 特别是城市道路高峰拥堵时段, 车辆密度要高于测试 case1, 我们需要充分评估其对通信的影响, 以及进而对应用的影响。

6.2. 交叉路口 OBU 间通信测试

测试目的:

探究交叉路口拥挤场景下, 不同位置测试车的通信性能。

测试用例:

参数配置: 10MHz+10MHz 双资源池, 开启拥塞控制。

测试环境: 以道路中心为坐标原点, 建立直角坐标系, 用以描述每台测试车的位置, 测试环境以及每台测试车的编号及摆放位置如下图。



图 12：外场测试区域

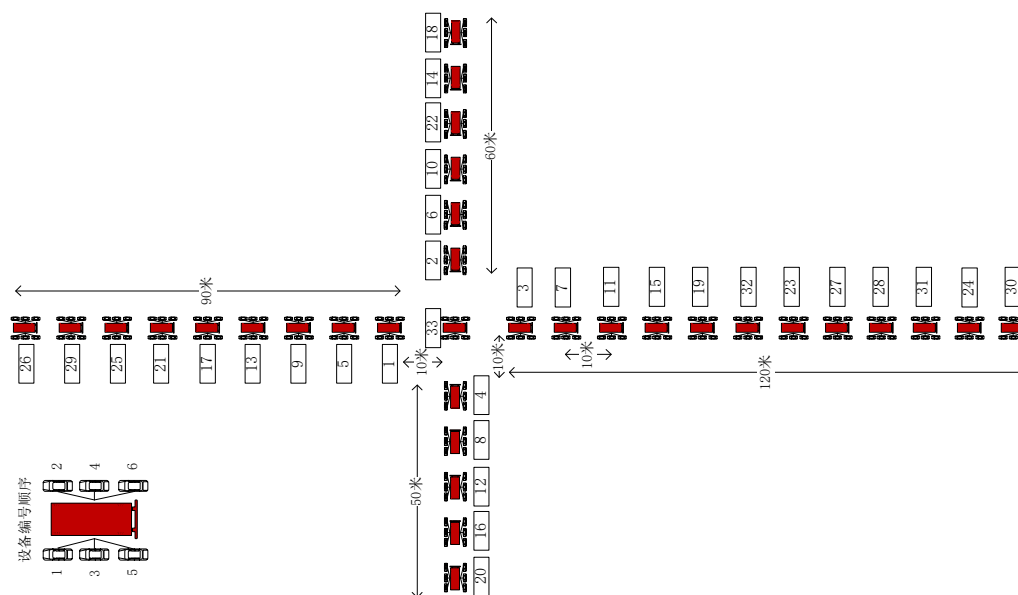


图 13：测试车编号及摆放位置

6.2.1. 信道繁忙率 CBR

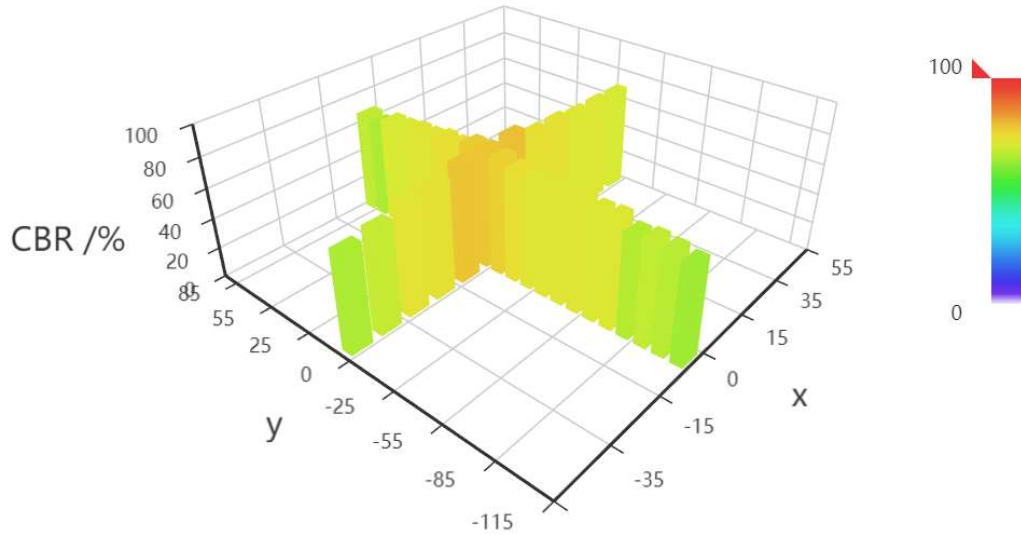


图 14: 测试车监听的平均 CBR 与设备位置的关系

如图 13 所示为每台测试车监听信道 CBR 的平均水平。在十字路口中心为最拥挤处，100 米半径范围内 OBU 设备数约为 186 台，此时 CBR 有最大值 79.6%。

6.2.2. 发包间隔 ITT

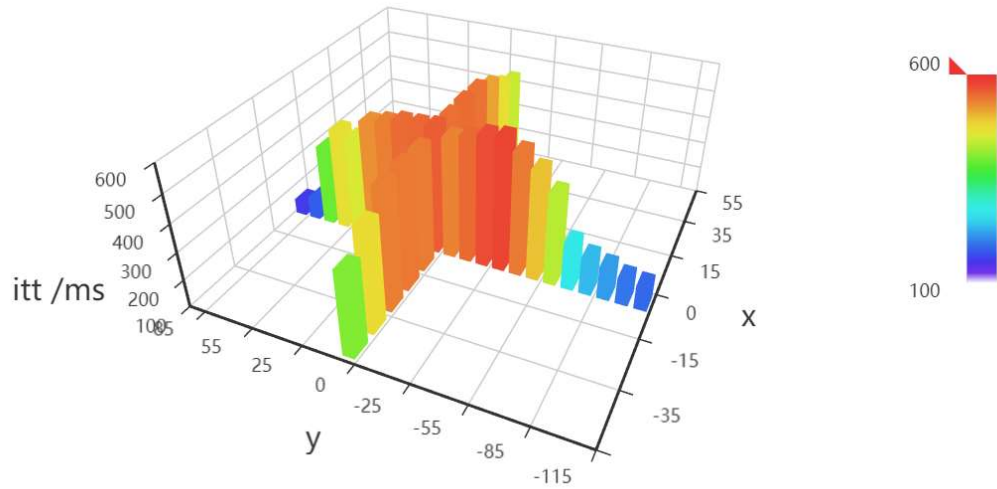


图 15: 设备的 ITT 与设备位置的关系

基于车辆密度的拥塞控制算法在设备静止的情况下，设备应用层的发包间隔主要受到设备周围 100 米内的车辆总数的影响，根据算法中 \max_ITT 的计算公式（见 3.3.4 应用层拥塞控制），车辆密度越高的地方，设备的发包间隔随之增大。当 100 米范围内车辆数达到 150 时，ITT 最高为 600ms。在本次测试中，设备以测试车为单位，两测试车间的距离为 10m。因此路口中心的车辆密度理论最高能够达到 190 台左右，发包间隔能够达到最大值 600ms。实际中，由于环境遮挡，GPS 定位精度误差，测试车摆放位置误差等因素的影响，路口中心的车辆密度在 186 左右，设备发包间隔如上图所示，最大发包间隔达到 576.8ms，且由路口中心向道路四周降低。

6.2.3. 时延 Delay

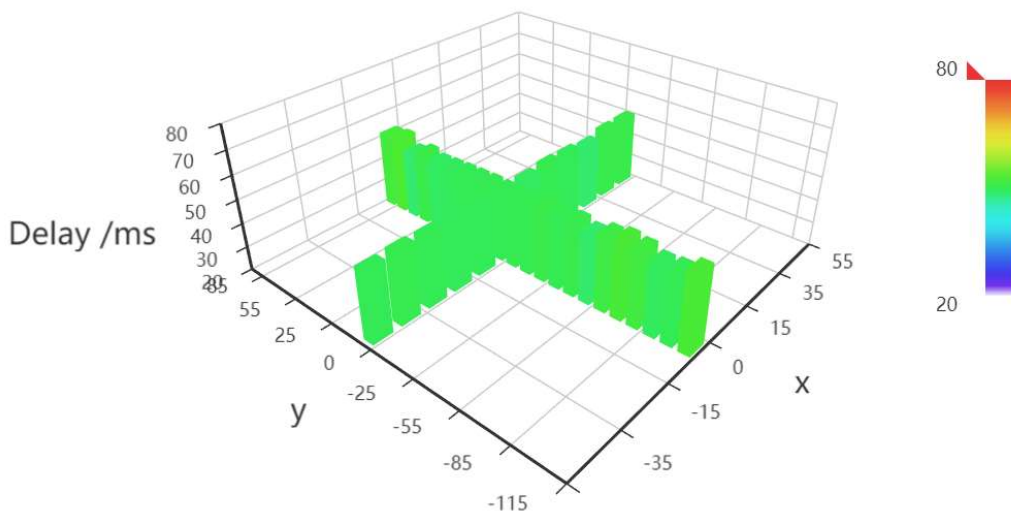


图 16: 测试车的平均通信时延

各测试车的平均传输时延, 均稳定在 50ms 左右, 与测试车的摆放位置无明显影响。

6.2.4. 丢包率 PER

交叉口拥堵时, 无需考虑过远距离的车辆间通信情况, 更关注附近车辆的通信情况, 这里考虑 100 米半径范围内的通信。

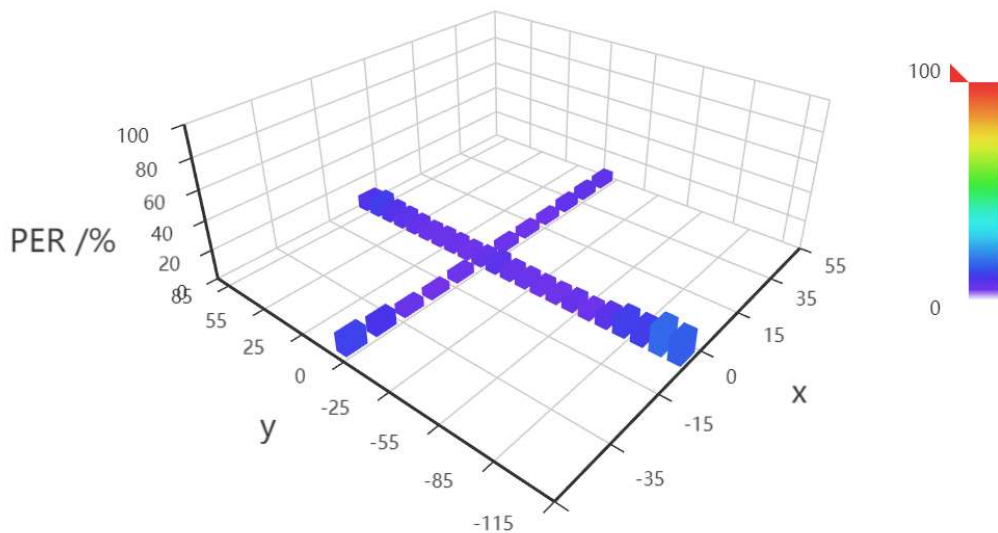


图 17: 100 米通信范围内的各测试车平均接收丢包率

上图结果显示, 在交叉路口拥挤路段, 测试车 100 米通信范围内数据包的平均接收丢包率均稳定在 6%左右。个别测试车受到地势及树木遮挡的影响, 接收丢包率较高。

关键位置测试车通信性能的分析:

以道路中心为坐标原点建立坐标系，使用坐标点描述每台测试车的位置。

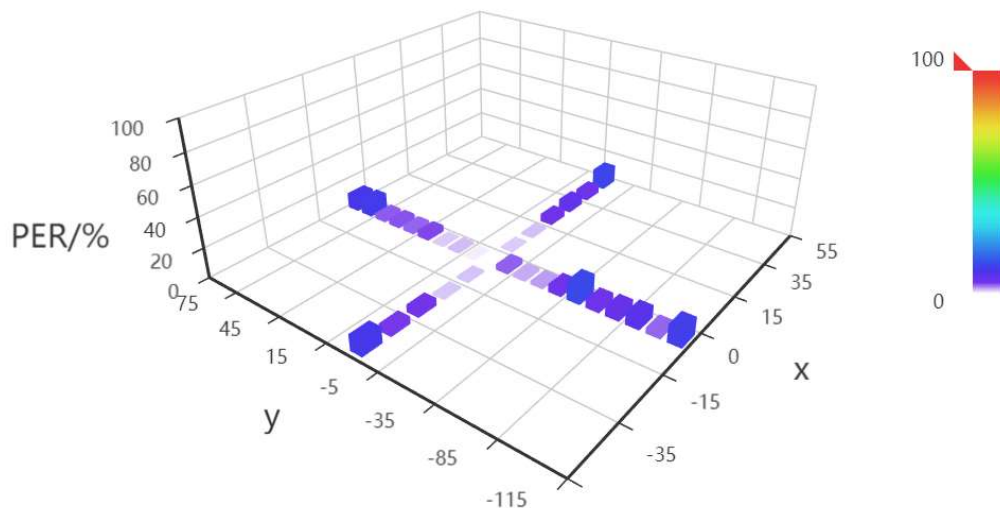


图 18：中心测试车（33 号车）接收道路四周测试车

道路中心测试车接收道路四周测试车发送数据包的平均丢包率基本稳定，平均值为 7%左右。部分测试车由于所处位置地势的原因，中心测设车无法较好的接收来自其的数据包。

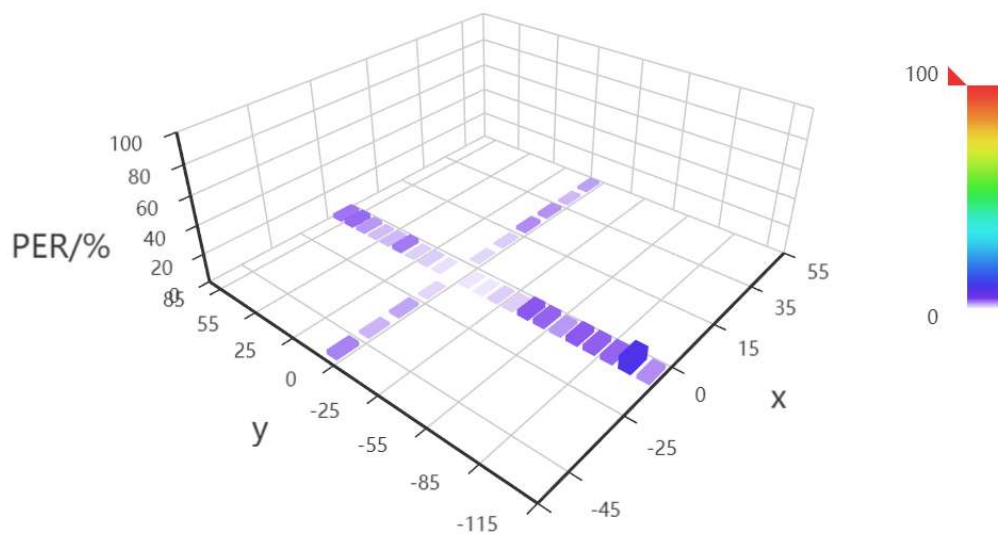


图 19：道路四周测试车接收路口中心测试车（33 号）

道路四周测试车接收交叉路口中心测试车（33 号车）发送数据包的平均丢包率大多在 4%以下，较为稳定，中心测试车发送的消息具有较好的覆盖性。

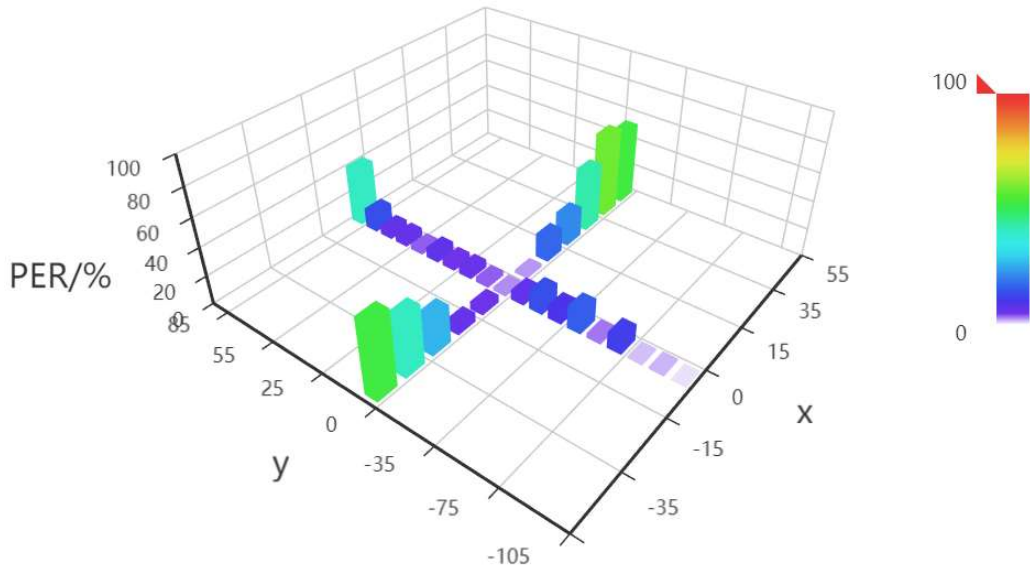


图 20：道路最南端测试车（30 号）接收其他测试车

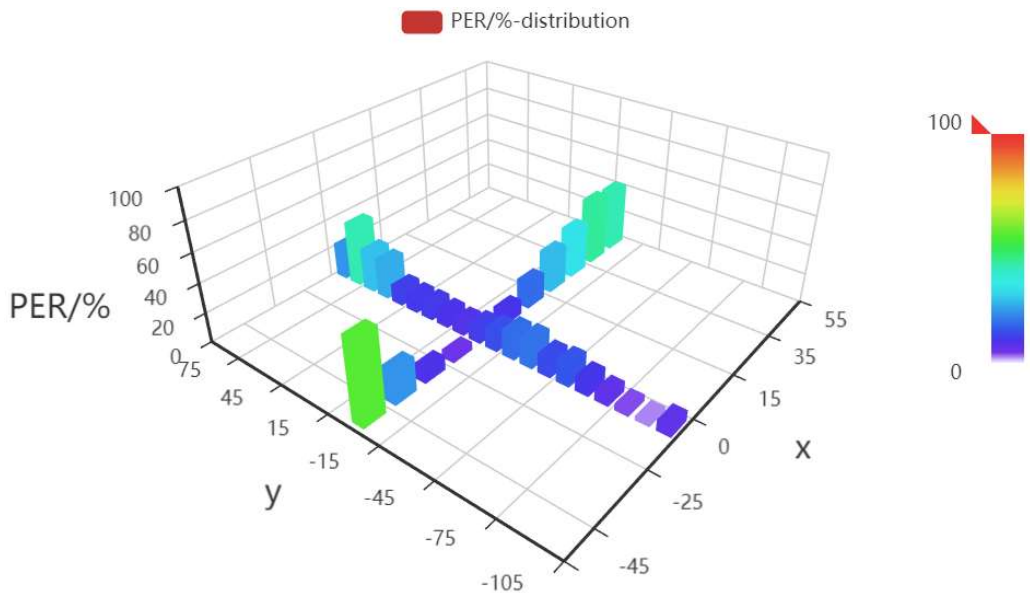


图 21：其他测试车接收道路最南端测试车（30 号）

受到交叉路口区域周围房屋、绿化树木遮挡的影响，x 轴方向的测试车与 30 号测试车（y 轴负方向端点）测试车之间的通信表现较差，丢包率最高接近 60%。同时由于天线的朝向（y 轴正向测试车天线方向朝向 30 号车，y 轴负方向测试车天线方向背向 30 号车），沿 y 轴正向测试车与 30 号测试车之间的丢包率随着距离增加而增加，但是到达交叉路口中心时再次降低，之后距离增加，丢包率再次增加。

6.2.5. 小结

由于测试场地的原因，实际测试中的交叉路口未能按照四周等长摆放测试车。最拥挤处为交叉路口的中心，100 米通信范围内最大约为 186 台设备。监听信道

最大的 CBR 值为 79.6%，位于交叉路口中心的测试车的数据包发送间隔为 576.8ms，基本符合拥塞控制算法的理论值。100 米（半径）通信范围内，测试车接收数据包的丢包率基本在 6%左右，表现较为理想。由于道路旁树木的遮挡，处于道路四周测试车的接收性能受到些许影响，接收丢包率最高达到 17.4%。

道路四周测试车接收道路中间测试车的平均丢包率在 4%以下，交叉路口中间位置测试车消息的覆盖表现较为良好。受到交叉路口四周道路旁房屋和绿化树木的遮挡，消息的传播衰减较大，相邻两条道路设备之间的接收性能较差。

6.3. 直行道路 OBU 间通信测试

测试目的：

探究直行道路拥挤场景下，不同位置测试车的通信性能。

测试环境：



图 22：外场测试环境

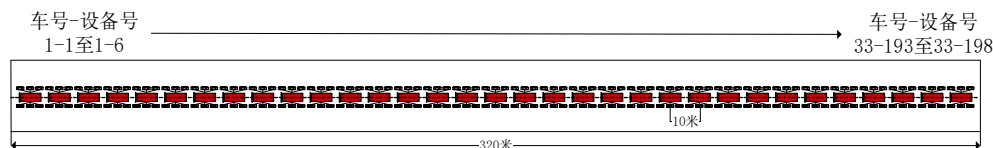


图 23：测试车标号及摆放

参数配置：

10MHz+10MHz 双资源池，测试 OBU 设备开启拥塞控制。

6.3.1. 信道繁忙率 CBR

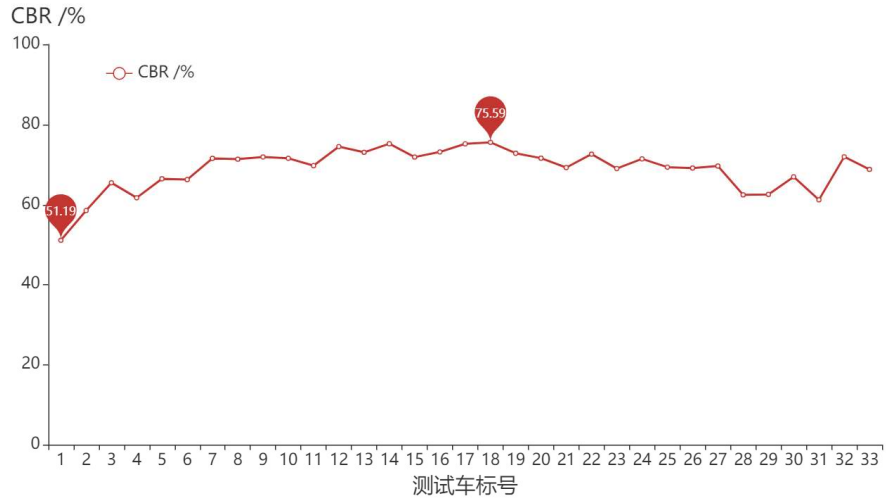


图 24：测试车监听信道的平均 CBR

位于直行道路中间拥挤路段，100 米半径通信范围内约有 110 台 OBU 设备，此时 CBR 最高，达到 75.6%。

6.3.2. 发包间隔 ITT

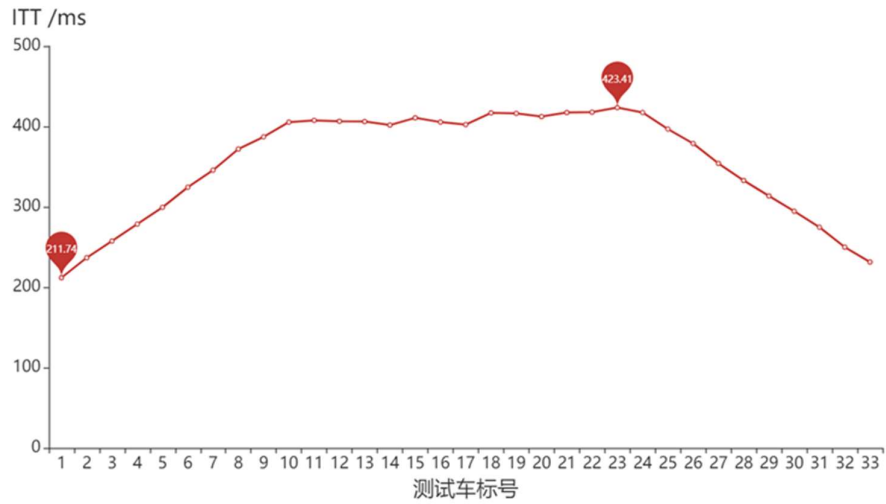


图 25：测试车的平均发包间隔

直行道路中间拥挤路段，在 100 米范围内约有 110 台 OBU 设备，位于其中的测试车的平均发包间隔最高为 423.4ms，符合拥塞控制算法的计算结果。

6.3.3. 丢包率 PER

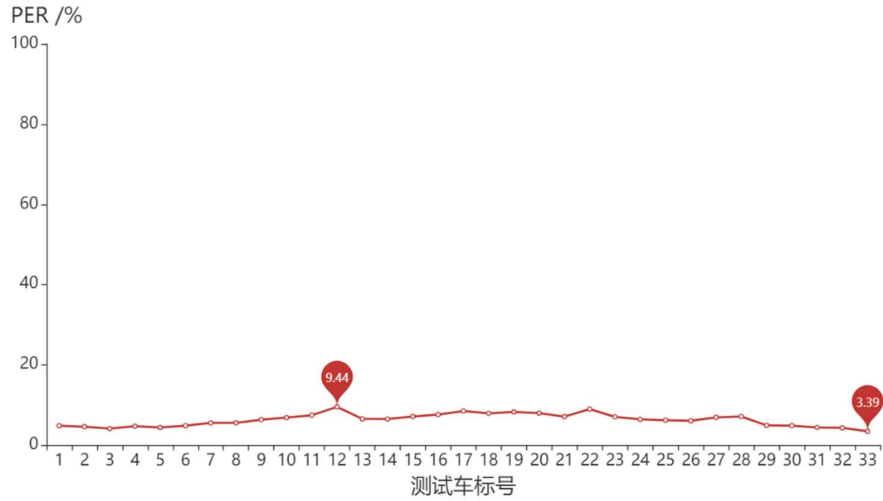


图 26: 测试车 100 米通信范围内的平均接收丢包率

100 米通信范围内，在道路最拥挤的路段（约 110 台 OBU 设备，100 米半径范围），测试车接收数据包的平均丢包率最高为 9.44%，在道路边缘，接收丢包率下降，最低为 3.39%。

关键位置测试车通信性能的分析：

x 轴表示其他测试车与关键位置测试车的距离。

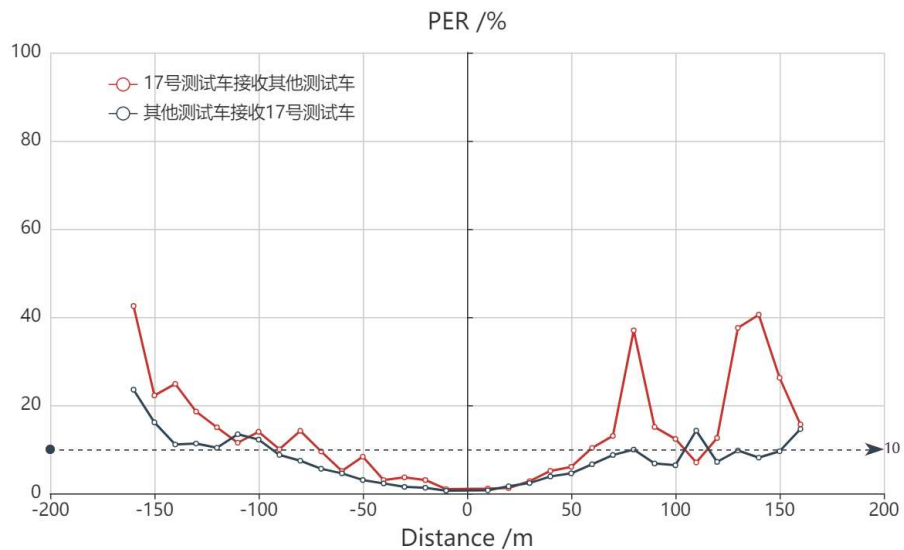


图 27: 直行道路中点测试车与其他测试车的通信

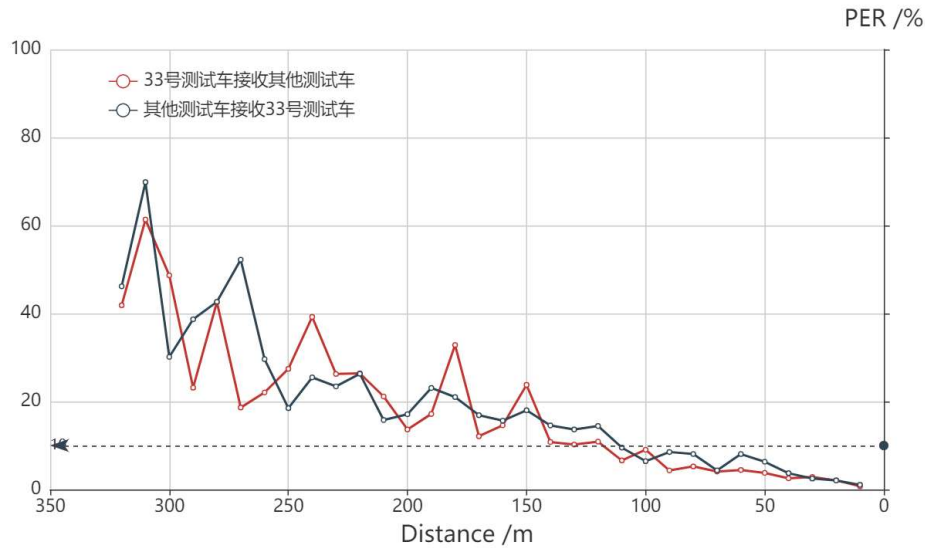


图 28：直行道路一端测试车与其他测试车的通信

由于测试场地地势的原因和外界干扰，某些位置测试车的通信会受到影响，因此丢包率出现波动。但整体的趋势仍然可以反映出随着通信距离增加，关键位置测试车与其他测试车之间的丢包率增加。

6.3.4. 时延 Delay

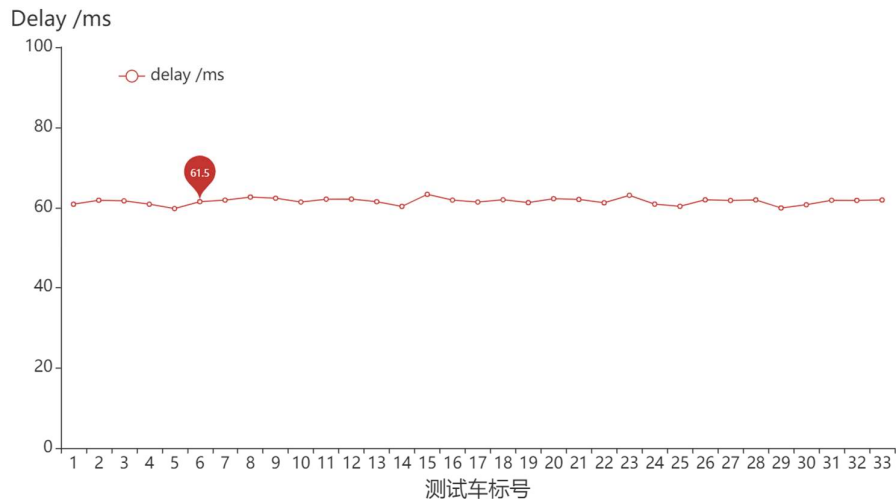


图 29：测试车之间的传输时延（标记点为平均值）

如上图所示，各测试车之间的传输时延均稳定在 61.5ms 左右，与测试车的位置和设备的拥挤程度无明显变化。

6.3.5. 小结

直行道路总计 320 米左右，共摆放 33 台测试车。道路中间为拥挤路段，100 米（半径）通信范围内约有 110 台 OBU 设备，位于其中测试车的平均 ITT 值最大为 423.4ms，符合应用层拥塞控制算法的计算结果，丢包率最高达到 9.44%，在拥挤条件下，OBU 设备对通信资源的竞争较为激烈，对数据包的接收造成干扰。

通过分析关键位置测试车与其他测试车的通信，可以看到数据包传输的丢包率与距离的增加变化明显。

6.4. 拥塞控制算法对通信性能的影响对比

测试目的：

探究开启拥塞控制算法后对通信性能的影响。

测试用例：

直行道路拥挤场景下，OBU 设备之间的通信测试。

case1: 10MHz+10MHz 双资源池 开启拥塞控制 (CC)

case2: 10MHz+10MHz 双资源池 不开启拥塞控制 (noCC)

6.4.1. 信道繁忙率 CBR

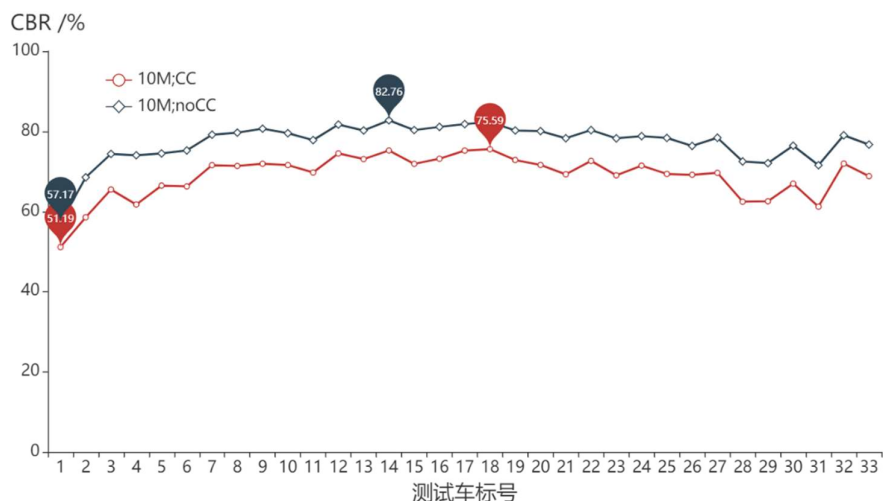


图 30：测试车监听信道的平均 CBR（标记点表示每个 case 的最大最小值）

拥塞控制算法对 CBR 的影响并不明显。在道路中间拥挤路段（约 110 台 OBU 设备，100 米半径范围内），未开启拥塞控制时，测试车监听信道的平均 CBR 最高达到 82.7%，而开启拥塞控制后，测试车监听信道的平均 CBR 最高仍达到 75.6%，相比于未开启拥塞控制，仅降低 7%。

需要注意的是，在本次测试中，通信模组的物理层是以 100ms 的固定周期进行通信资源的选择，应用层拥塞控制算法并未改变这个固定周期，可能因此导致在有无拥塞控制算法的影响下，CBR 都处于较高的水平。

6.4.2. 发包间隔 ITT

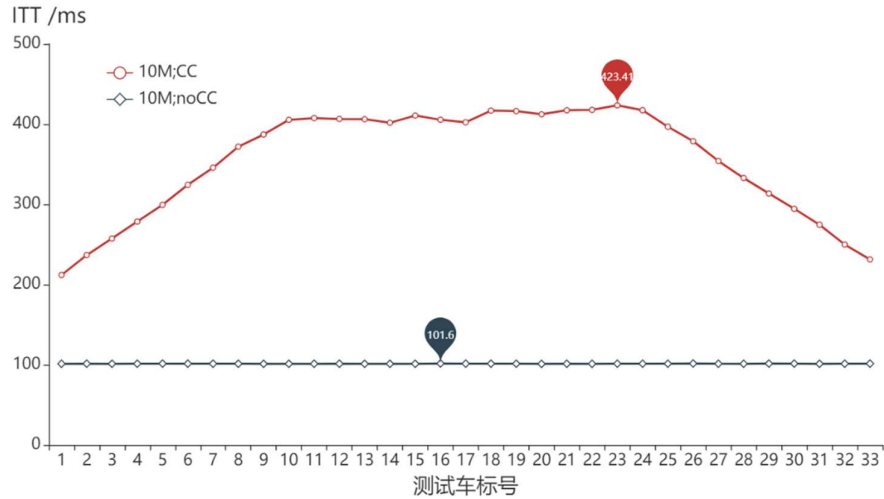


图 31：测试车的平均发包间隔（标注值为每个 case 的最大值）

拥塞控制算法对测试车发包间隔的控制作用十分明显。在道路中间拥挤路段（约 110 台 OBU 设备, 100 米半径范围内），测试车的发送间隔最大达到 423. 41ms，符合拥塞控制算法的计算结果。

6. 4. 3. 丢包率 PER

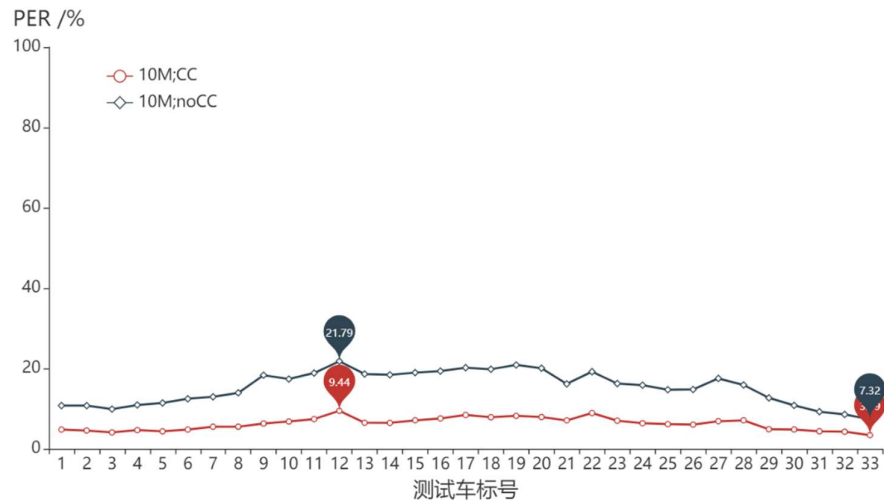


图 32：通信范围 100 米内，测试车接受数据包的平均丢包率（标注点为每个 case 的最大、最小值）

开启拥塞控制后，测试车的接收表现得到明显提升，在道路中间拥挤路段，OBU 设备受到拥塞控制的影响，设备的发包间隔增加，降低了通信资源的调度频率，一定程度上缓解了 OBU 设备间的竞争和接收端受到的干扰。测试结果如图所示，未开启拥塞控制时，在道路中间拥堵路段（约 110 台 OBU 设备, 100 米半径范围）测试车的平均接收丢包率高达 21.8%，而开启拥塞控制后，相同路段中测试车的丢包率最高为 9.4%，降低了 12% 左右。

6. 4. 4. 时延 Delay

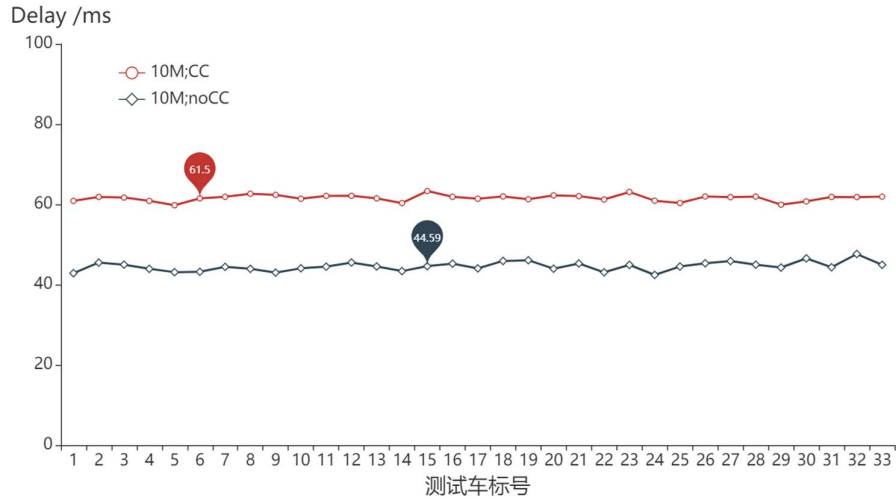


图 33: 测试车的平均传输时延 (标注点为每个 case 的平均值)

未开启拥塞控制时, 各测试车之间的平均传输时延稳定在 44.6ms 左右, 而开启拥塞控制后, 各测试车之间的平均时延在 61.5ms 左右, 相比增加了约 15ms。在高密度时, 开启拥塞控制后, OBU 设备在底层选取通信资源时, 为了避免资源冲突, 花费更多的时间进行资源调度, 而未开启拥塞控制, 则不会开启该机制。

6.4.5. 信息生存周期 IA (100ms 周期计算)

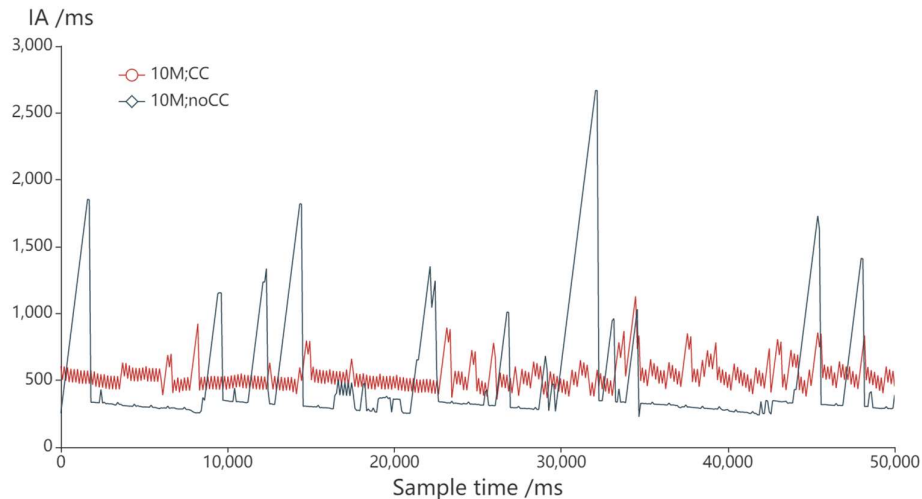


图 34: 直行道路中间设备接收道路端点设备 IA (100ms 为周期, 总计 500 个采样点)

如图所示为不同测试 case 下, 道路中间设备接收道路端点设备的连续 IA 值, 以 100ms 作为统计周期, 共计 500 个采样点进行观察。可以看到, 开启拥塞控制后, IA 值稳定在 500ms 左右, 说明道路中间设备每隔约 500ms 收到一次来自道路端点设备的数据包, 连续接收较为稳定。而未开启拥塞控制时, IA 值出现连续的波动, 道路中间设备会在较长时间 (最大间隔 2.5s) 无法收到来自道路端点设备的数据包, 侧面反映道路中间设备接收道路端点设备的连续丢包率较高。

6.4.6. 小结

拥塞控制算法通过增加应用层发送数据包的时间间隔, 降低了 BSM 消息的发

送频率，但是参与测试中的 OBU 设备数目并未减少，资源池的半持续调度方式（SPS）决定了 OBU 设备周期性的占用通信资源，可以看到测试结果中，对于直行道路中间拥挤路段，CBR 最大值为 75.6%，拥塞控制算法仅减少了 7%左右的 CBR（原因见 6.4.1 节）。

但是受到拥塞控制的影响，OBU 应用层发送数据包的间隔明显增加，有效缓解了 OBU 之间对于通信资源的竞争，在接收端，不同 BSM 消息之间的干扰降低，使得消息成功解调的概率增加，OBU 接收数据包的丢包率得到一定程度改善。对于传输时延，拥塞控制算法一定程度上增加了时延。拥塞控制算法最为显著的作用体现在信息生存周期，设备更新数据包的间隔更加稳定，非常显著地改善了 IA 的均匀程度。

6.5. 直行道路移动车辆通信测试

测试目的：

测试移动车在不同速度下，与其他测试车之间的通信性能。以及移动测试车在行驶过程中，接收 EVENT 消息的表现。

测试环境：



图 35：外场测试环境

信道配置：

10MHz+10MHz 双资源池，测试 OBU 设备开启拥塞控制。

6.5.1. 单移动车通过直行道路

单个移动车辆参与的场景中，希望探究静止测试车对于移动测试车的位置追踪误差。测试中，移动车以分别以 30km/h 和 60km/h 的速度往返经过拥挤路段。

位置追踪误差 Tracking error:

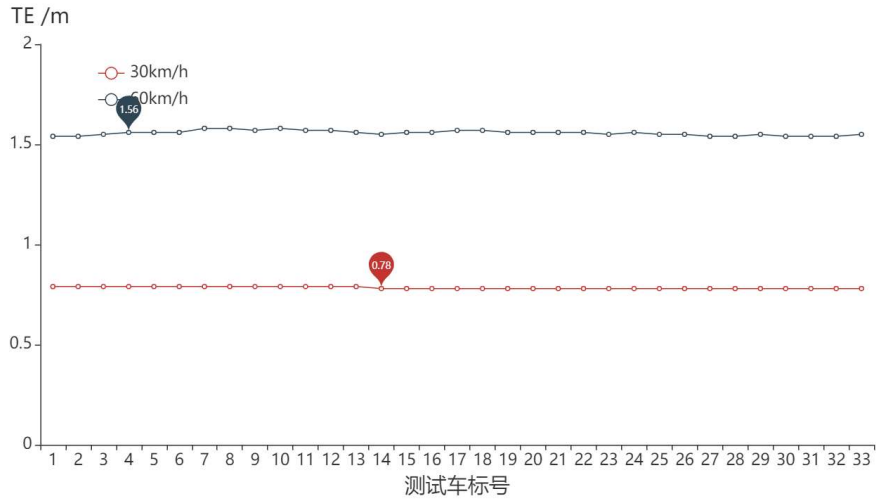


图 36: A 类 GPS 设备测试的位置追踪误差

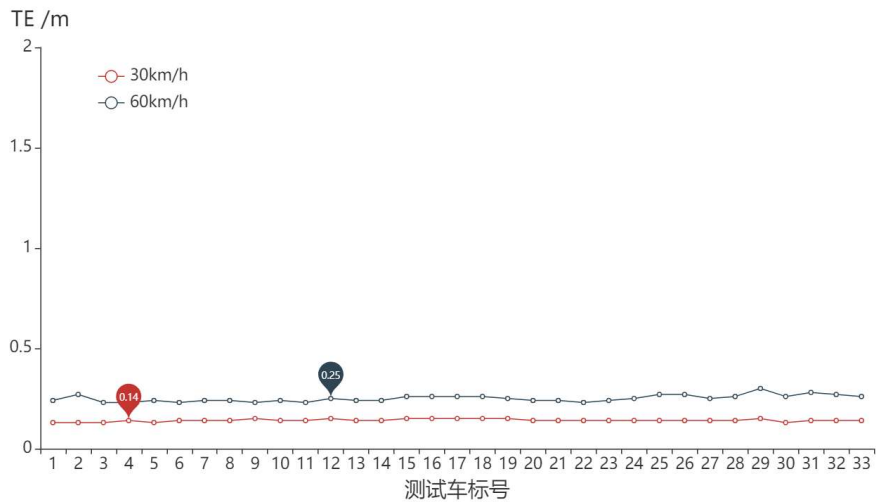


图 37: B 类 GPS 设备测试的位置追踪误差

位置追踪误差（Tracking error）表示设备 1 推算设备 2 的位置与设备 2 实际位置的误差。

本次测试中分别对两类 GPS 设备（米级精度 A 类设备和亚米级精度 B 类设备）进行了测试。结果表明，位置追踪误差指标，受 GPS 模组精度的影响明显。GPS 模组精度越高，位置追踪误差越低，对于应用的准确性更高。

此外，移动车辆速度增加后，静止测试车推算移动车辆的位置误差更大。

6.5.2. 双移动车通过直行道路

双移动车保持 50 米左右的间距通过直行道路拥挤路段，两辆车的速度维持在 30km/h 左右。前面行驶的车一定概率触发 event 事件，连续发送 10 次 EVENT 消息，后方追赶车辆测试前车发送的 SPS 消息和 EVENT 消息的接收情况。

双移动测试车先后经过 OBU 设备摆放低密度路段，OBU 设备摆放高密度路段，OBU 设备摆放低密度路段，使用标号 1，2，3，分别标识三个不同拥挤程度的区

域路段。

如下为后车接收前车发送的 SPS 消息和 Event 消息的情况。

丢包率 PER:

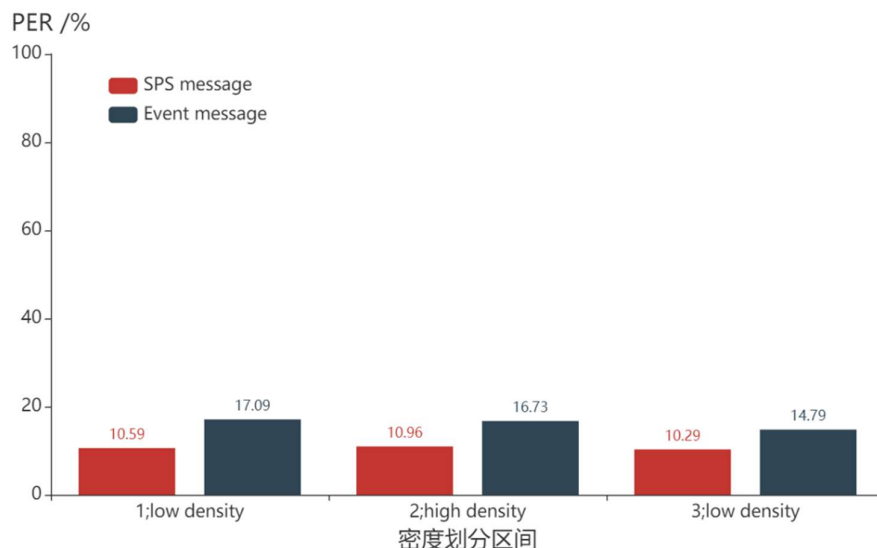


图 38: 三个区域内 SPS 消息和 EVENT 消息的平均丢包率

如结果所示，三个不同拥挤程度的区域内，后车接收前车 Event 消息的丢包率略高于 SPS 消息。考虑到 Event 消息不同于 SPS 消息的发送机制，且具有较高优先级，Event 消息的发送不受拥塞控制算法影响，触发 event 事件就会立刻发送，但是在进行通信资源的选择时会有更大的概率发生冲突（在 OBU 设备较高密度时，冲突概率更高），容易受到较大的干扰，不利于接收端的接收，进而影响 Event 消息的丢包率。而 SPS 消息保持半持续调度的方式进行资源选择，有 1000ms 的监听时间，在选择通信资源时则不易发生碰撞。

收包间隔 IPG（最大值）：

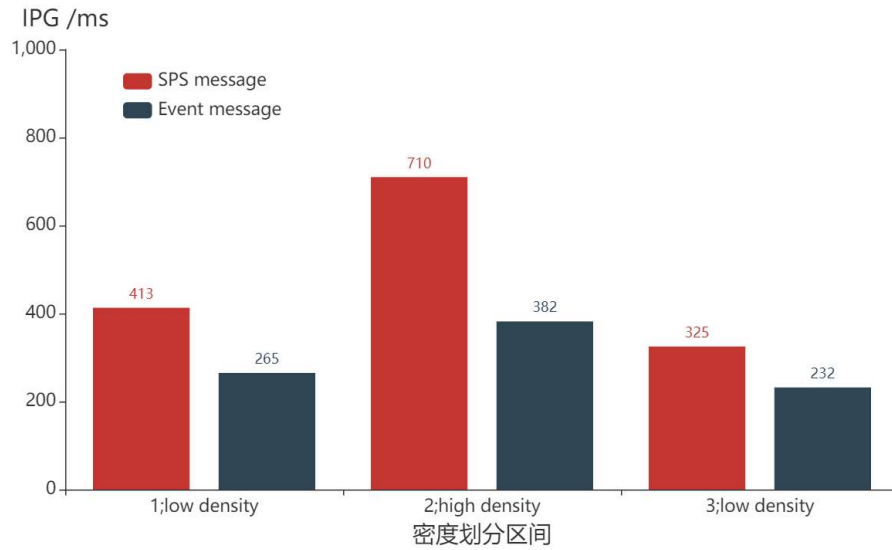


图 39：三个区域内 SPS 消息和 EVENT 消息的最大收包间隔

Event 消息相较于 SPS 消息具有更低的收包间隔，消息更新周期更快，符合 event 消息的设计目标，主要原因是 Event 消息具有较高优先级，不受拥塞控制算法的影响，触发 event 事件就会立刻发送。

时延 Delay:

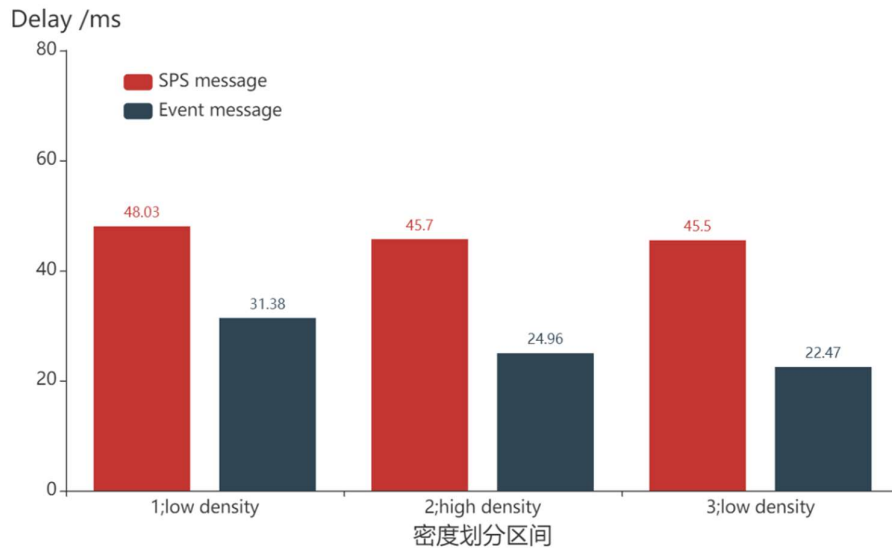


图 40：三个区域内 SPS 消息和 EVENT 消息的传输时延

测试结果表明 Event 消息相较于 SPS 消息具有更低的传输时延，满足紧急的应用业务，符合 event 消息的设计目标。

6.5.3. 小结

本次测试对移动车辆通过道路拥挤路段时的通信表现进行了初步探究，模拟

堵车场景下，对向车道或者应急车道的两车通信。对于单车移动通行过程，我们更关注处于拥挤中的车辆接收路旁移动车的交通信息。这里使用了一个更加直观的指标，位置追踪误差 Tracking Error，用以反映收发链路之间通信的稳定性，推算位置与实际位置误差较大，说明接收端无法及时更新数据，即在某一段时间内的连续丢包率较大，这在移动车速度不同（分别为 30km/h 和 60km/h）时，差异明显。但这个指标受到 GPS 模组本身精度的影响较大，因此报告中给出了两类 GPS 模组数据。对于双车移动通行过程，我们关注于前车触发 EVENT 事件后，后车是否能及时的做出应对，于是报告分别展示了 SPS 消息和 Event 消息的对比。Event 消息的发送机制不同于 SPS 消息，不会受到拥塞控制的影响，触发 EVENT 事件就会立刻发出，以及时通知后车为目标。测试结果中显示 Event 消息的传输时延为 24 毫秒左右，明显低于 SPS 消息，符合设计目标。但是，为了较快的发送，在通信资源的选择时更容易发生碰撞，被成功接收的概率也会降低。

6.6. 交叉路口 OBU 与 RSU 间通信测试

测试目的：

探究交叉路口 RSU 的覆盖情况，RSU 发送四种不同字节大小、不同优先级消息被 OBU 设备接收的差异性，以及部署双 RSU 对单 RSU 覆盖性能的补强情况。

测试用例：

RSU 和 OBU 使用 10MHz+10MHz 双资源池时，OBU 开启拥塞控制，交叉路口中间部署 RSU 和道路四周 OBU 的通信测试。

测试环境：

RSU 的摆放位置及标号如下图所示。



图 41：外场测试环境

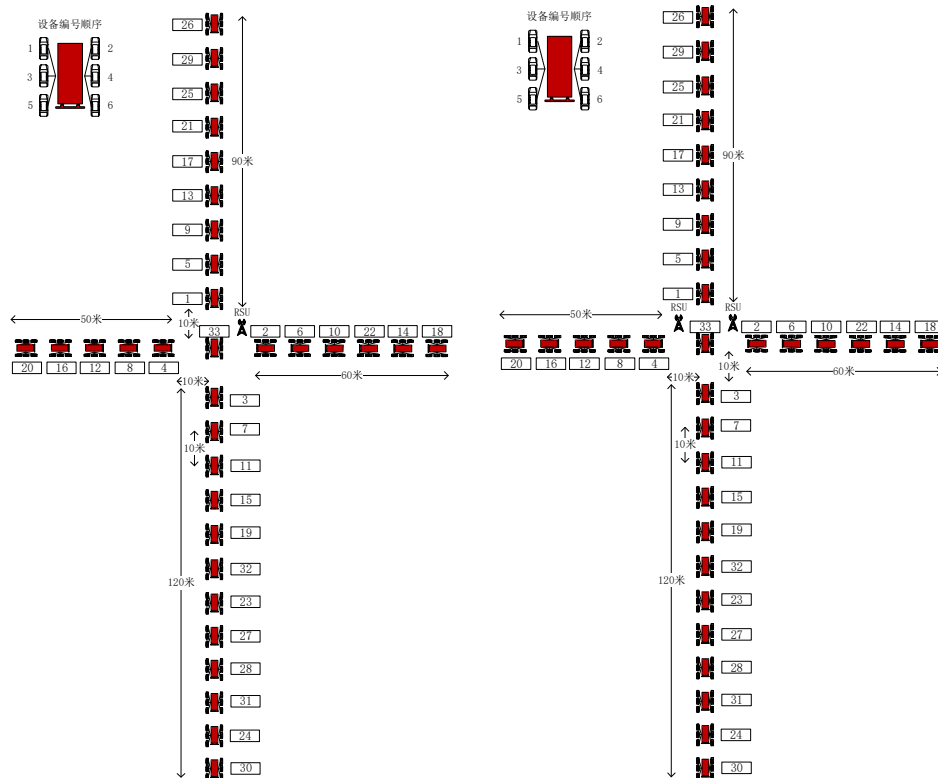


图 42：单 RSU 部署（左）和双 RSU 部署（右）

6.6.1. 丢包率 PER

以交叉路口中心为坐标轴原点建立坐标系，使用坐标点表示测试车的摆放位置。

测试车接收 RSU 发送 MAP 消息的丢包率

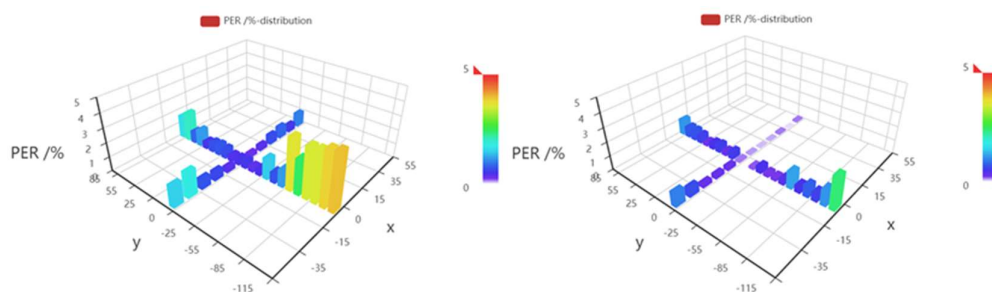


图 43：单 RSU（左）和双 RSU（右）（Z 轴最大值为 5%）

测试车接收 RSU 发送 SPAT 消息的丢包率

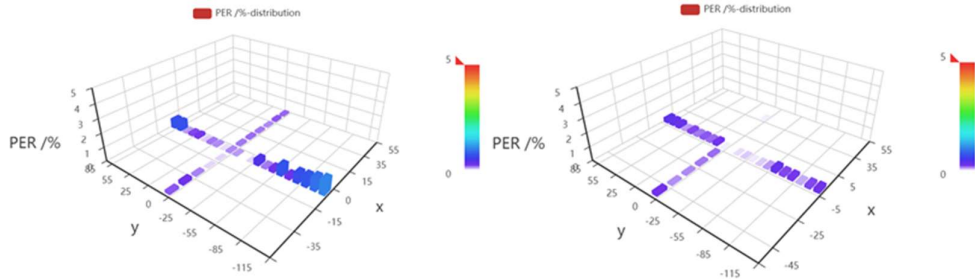


图 44: 单 RSU (左) 和双 RSU (右) (Z 轴最大值为 5%)

测试车接收 RSU 发送 RSM 消息的丢包率

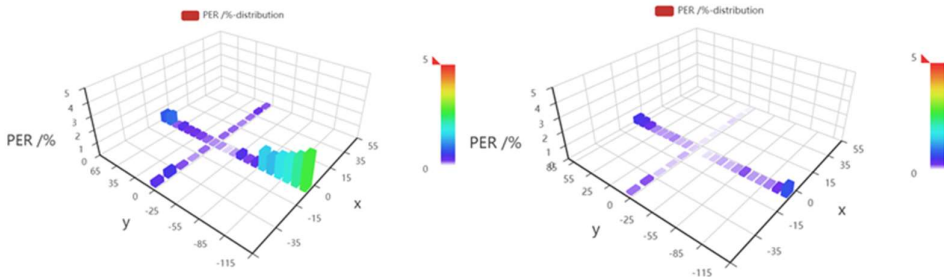


图 45: 单 RSU (左) 和双 RSU (右) (Z 轴最大值为 5%)

测试车接收 RSU 发送 RSI 消息的丢包率

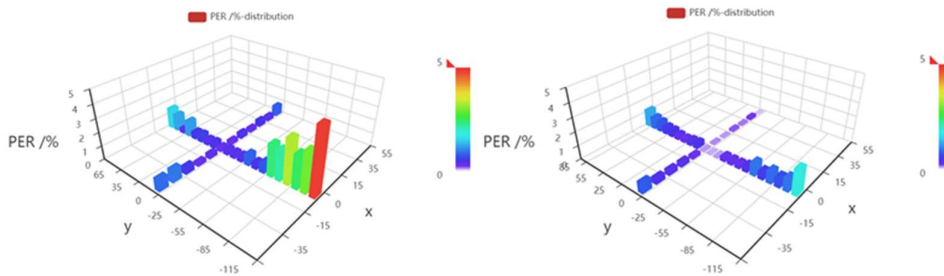


图 46: 单 RSU (左) 和双 RSU (右) (Z 轴最大值为 5%)

由于 RSU 摆放在 x 轴方向, 所以对于 y 轴方向的覆盖较差, 在 y 轴方向部署另一台 RSU 后, 可以覆盖整个交叉路口, 测试车接收 RSU 发送的四种消息的丢包率大多在 1% 以下。对于字节数较大的 MAP 消息 (1300B), 距离 RSU 超过 120 米后, 测试车的接收丢包率稍有增加, 但是丢包率最大值仅为 2.5%。可以看到消息字节数增加, 测试车的接收丢包率增加, 但是差距并不大。

6.6.2. 小结

在交叉路口部署双 RSU 对 RSU 消息的覆盖性能具有很大提升, 即使对于字节数较大的 MAP 消息 (1300B), 测试车的接收丢包率平均约为 1%。对于 RSU 四种不同大小和优先级消息的覆盖表现, 只有在距离 RSU 较远处, 才能较低差异, 接收丢包率相差仅在 1% 左右。

6.7. 直行道路 OBU 与 RSU 间通信测试

测试目的:

探究直行道路 RSU 的覆盖情况，RSU 发送四种不同字节大小、不同优先级消息被 OBU 设备接收的差异性，以及部署双 RSU 对单 RSU 覆盖性能的补强情况。

测试用例：

RSU 和 OBU 使用 10MHz+10MHz 双资源池时，OBU 开启拥塞控制，直行道路中间部署 RSU 和道路两端部署 RSU 时，OBU 的接收性能测试。

测试环境：



图 47：外场测试环境

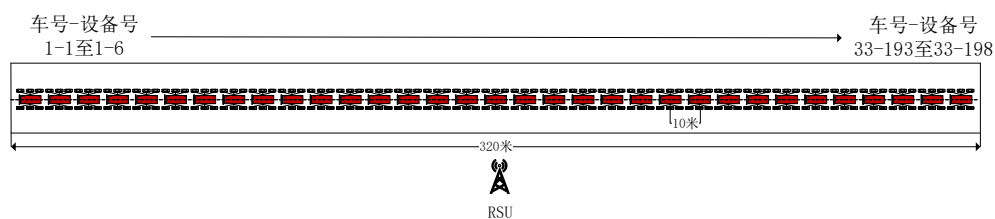


图 48：道路中间部署单 RSU



图 49：外场测试环境

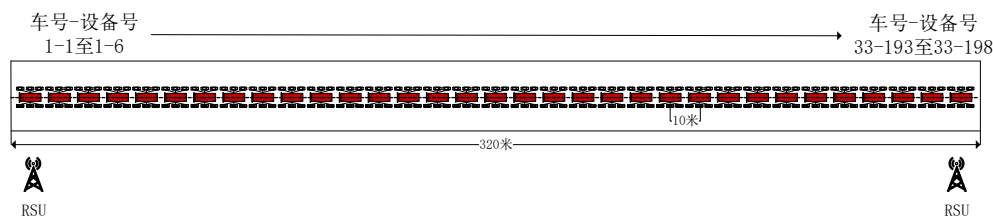


图 50：道路两端部署双 RSU

6.7.1. 丢包率 PER

10MHz+10MHz 双资源池，开启拥塞控制下，测试车接收 RSU 消息的平均丢包率：

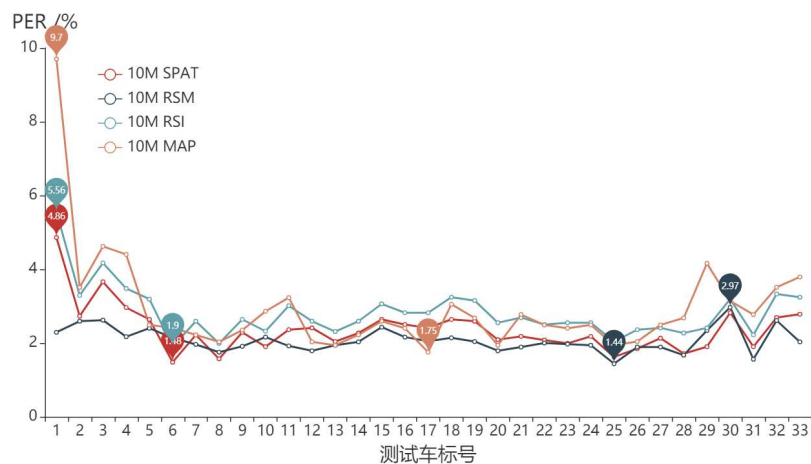


图 51：测试车接收部署在道路中间单 RSU 四种消息的丢包率

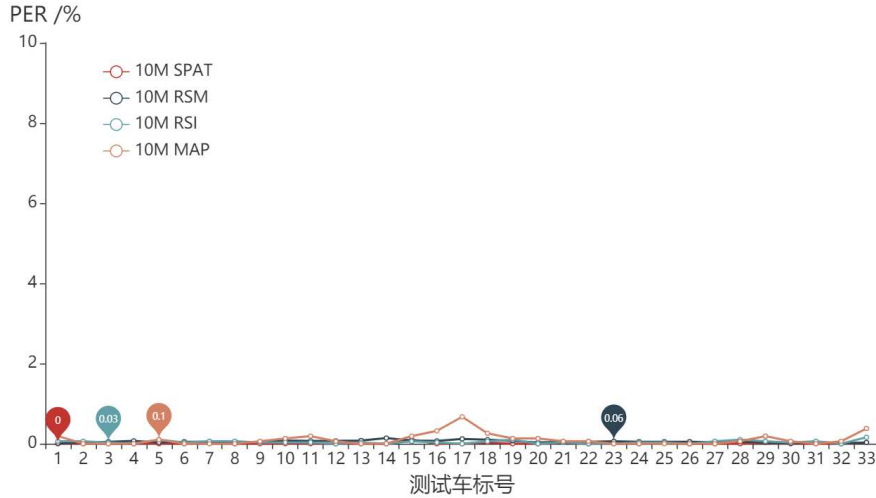


图 52: 测试车接收部署在道路两端双 RSU 四种消息的丢包率

相较于道路中心部署单 RSU，在道路两端部署双 RSU，可以对拥挤路段（约 320 米）的测试车具有极佳的覆盖效果，测试车接收 RSU 四种消息的平均丢包率在 0.05% 左右，可以保证对整个路段的覆盖。部署单 RSU 时，字节数较大的 MAP 消息（1300B），测试车的接收丢包率最高达到 9.7%，但是部署双 RSU 后，可以明显看到，MAP 消息的发送丢包率低于 1%。综合考虑 4 种消息，SPAT 消息（350B，优先级为 3），RSM 消息（600B，优先级为 5），RSI 消息（1000B，优先级为 6），MAP 消息（1300B，优先级为 8），仅部署单 RSU 时，字节数增加，发送丢包率增加，但是相差低于 1%，在距离 RSU 较远处，差异逐渐明显。

6.7.2. 时延 Delay

测试车接收部署在道路中间的单 RSU:

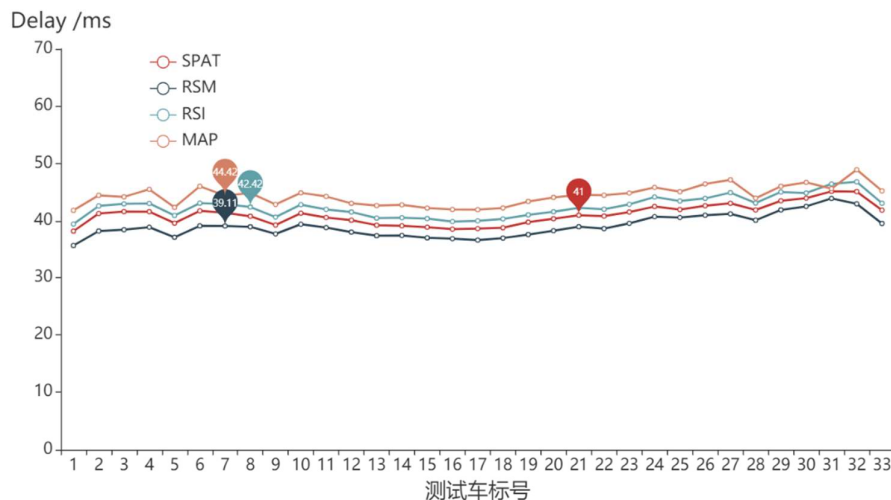


图 53: 测试车接收单 RSU 四种消息的时延

随着 RSU 消息占用字节大小的增加，消息的传输时延稍稍增加，但是差距并不明显。占用字节数最大的 MAP 消息（1300B）和占用字节数最小的 SPAT 消息（350B）之间的传输时延仅相差 5ms。

6.7.3. 小结

直行道路两端各部署一台 RSU 可以对该路段具有更好的覆盖性能，测试车接收四种消息的丢包率均在 0.05% 左右，表现极佳。

6.8. 资源池配置对通信性能的影响对比

测试目的：

探究不同的资源池配置对 OBU 设备之间通信性能的影响。10MHz+10MHz 双资源池时，以及 20MHz 单资源池时，OBU 之间、OBU 接收 RSU 消息的对比表现将在本节列出。

测试用例：

直行道路拥挤路段下，OBU 设备间进行通信测试。

case1: 10MHz+10MHz 双资源池，开启拥塞控制 (CC)

case2: 20MHz 单资源池，开启拥塞控制 (CC) baseline

case3: 20MHz 单资源池，不开启拥塞控制 (no CC)

6.8.1. 信道繁忙率 CBR

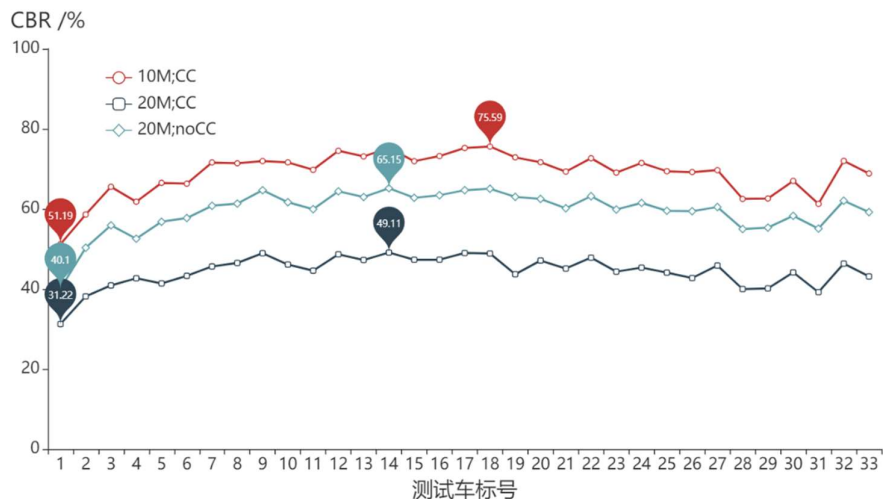


图 54：测试车监听信道的平均 CBR

10MHz+10MHz 双资源池时，开启拥塞控制后，在道路拥挤程度最高处，OBU 设备数最大约为 110 台，测试车监听信道的平均 CBR 最大值约为 75.6%。20MHz 单资源池时，开启拥塞控制后，同样的拥挤路段，测试车监听信道的平均 CBR 最大值约为 49.1%，相比 10MHz+10MHz 双资源池时下降了 25%。可使用的信道资源翻倍，对 CBR 的影响十分明显。

6.8.2. 发包间隔 ITT

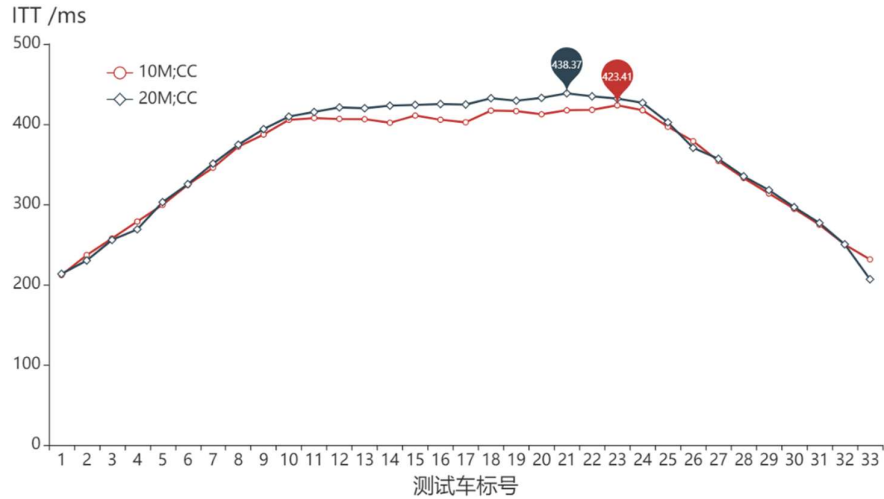


图 55: 测试车的平均发包间隔 (标注值表示每个 case 的最大值)

车辆发送数据包的时间间隔与车辆密度有关，资源池配置对该指标无影响。

6.8.3. 丢包率 PER

分析部署 RSU 的直路道路场景，对比开启拥塞控制后不同资源池配置下的 OBU 间丢包率和 OBU 接收 RSU 消息的丢包率。

OBU 设备间接收数据包的平均丢包率:



图 56: OBU 设备间接收数据包的平均丢包率

可用信道资源的提升对于测试车接收数据包性能的提升效果明显。10MHz+10MHz 双资源池，开启拥塞控制，V2V 通信平均 PER 为 26.91%，道路中心拥挤处（约 110 台 OBU 设备），测试车接收数据包的丢包率最高达到 36.68%。在 20MHz 单资源池时，同样的拥挤路段，测试车接收数据包的丢包率平均值为 4.04%，最大值为 6.52%。

不同资源池配置下，测试车接收部署在道路中心单 RSU 发送的 SPAT 和 RSM 消息:

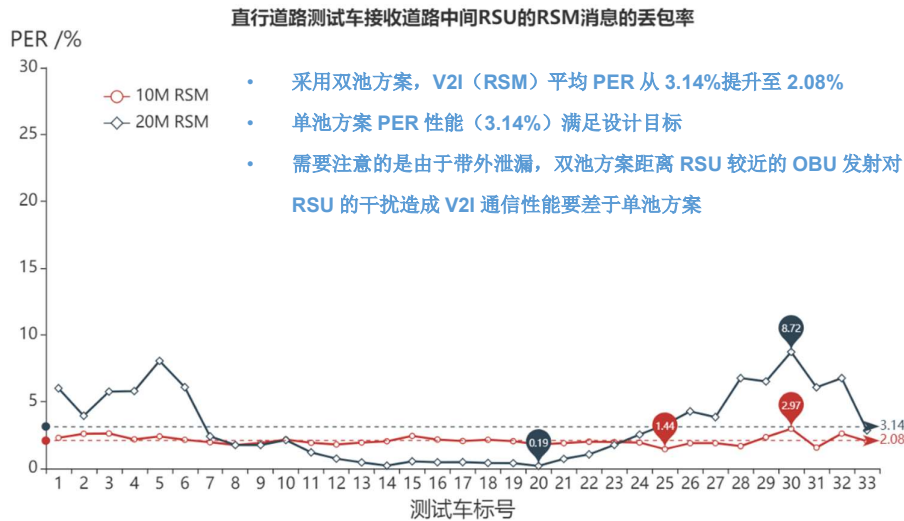
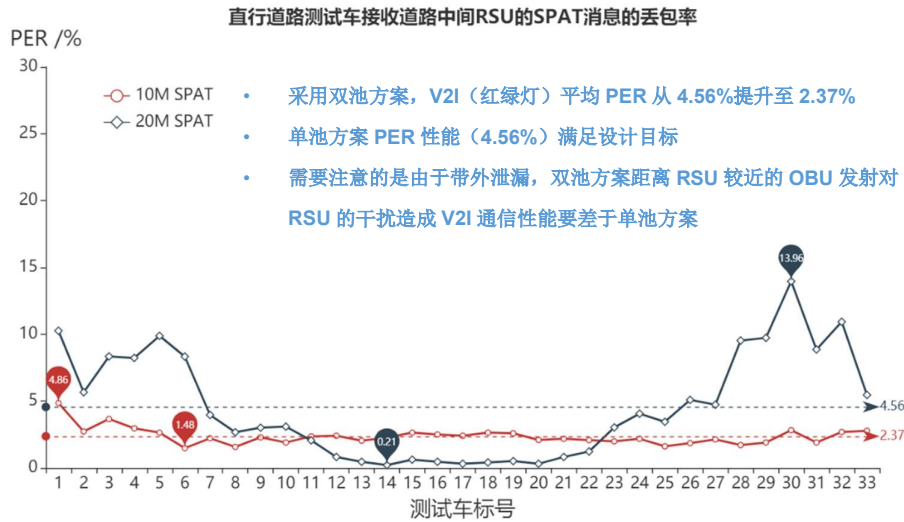


图 57: 不同资源池配置下, 直行道路测试车接收道路中间 RSU 的 SPAT 和 RSM 消息的丢包率

OBU 和 RSU 使用 10MHz+10MHz 双资源池时, 各测试车接收 RSU 的 SPAT 和 RSM 消息的平均丢包率均在 10% 以下, 平均值约为 2%。

OBU 和 RSU 混用 20MHz 单资源池时, 各测试车接收 RSU 消息的平均丢包率随距离变化十分明显, 在距离道路中心 RSU 约 50 米半径范围内, RSU 消息的传播衰减较低, OBU 设备接收 RSU 消息时受衰落的影响较小, 能够成功的接收来自 RSU 的消息, 因此平均接收丢包率在 0.65% 左右, 甚至优于 10MHz+10MHz 双资源池时; 而距离 RSU 较远处, RSU 消息的传播衰减增加, 且受到同频段各类消息的干扰, 测试车接收 RSU 消息的能力变弱, 平均接收丢包率增加。

不同信道配置下, 测试车接收部署在道路两端 RSU 发送的 SPAT 和 RSM 消息:

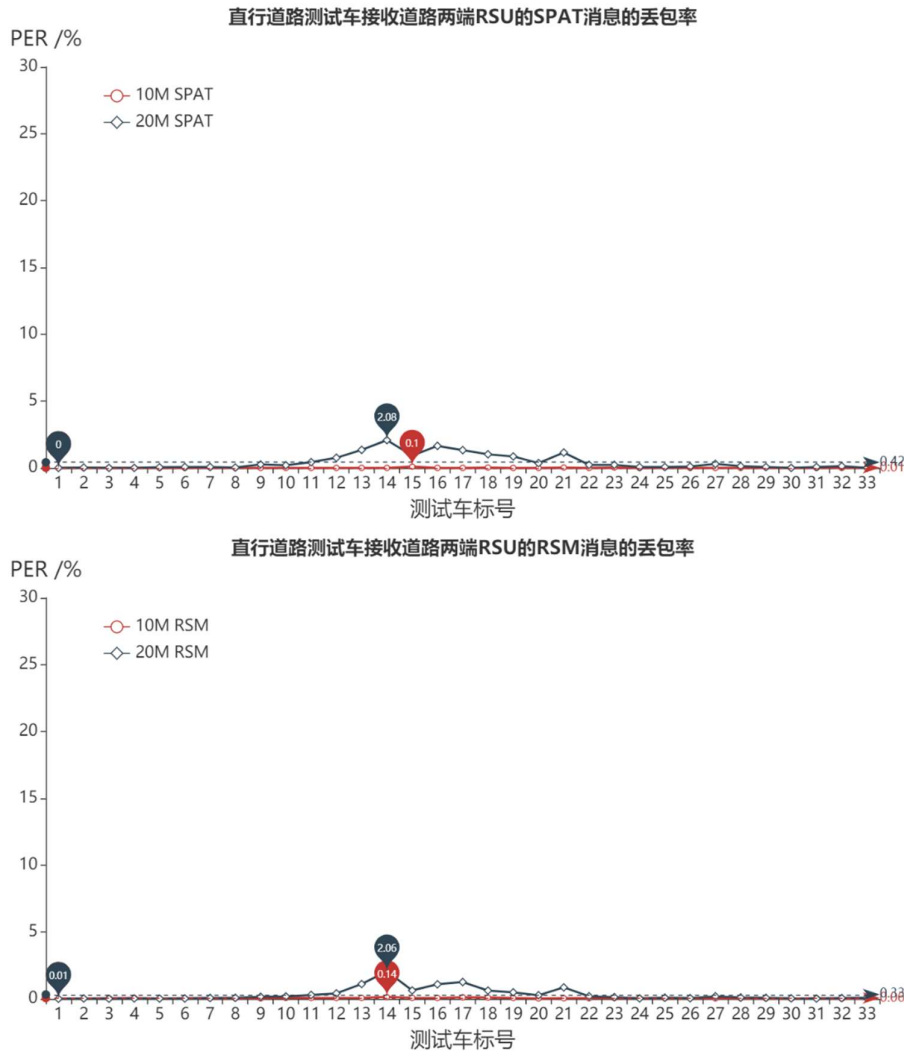


图 58：不同信道配置下，直行道路测试车接收道路两端 RSU 的 SPAT 和 RSM 消息的丢包率

道路两端 RSU 和 OBU 使用 10MHz+10MHz 双资源池，或者道路两端 RSU 和 OBU 混用 20MHz 单资源池时，道路两端 RSU 均能很好的覆盖整条直行路段（约 320 米），测试车接收 RSU 消息的平均丢包率均能保持在 1%以下（RSU 和 OBU 使用 10MHz+10MHz 双资源池时，测试车接收 RSU 消息的平均丢包率甚至可以保持在 0.1%以下）。

6.8.4. 时延 Delay

不同信道配置下 OBU 间的传输时延：

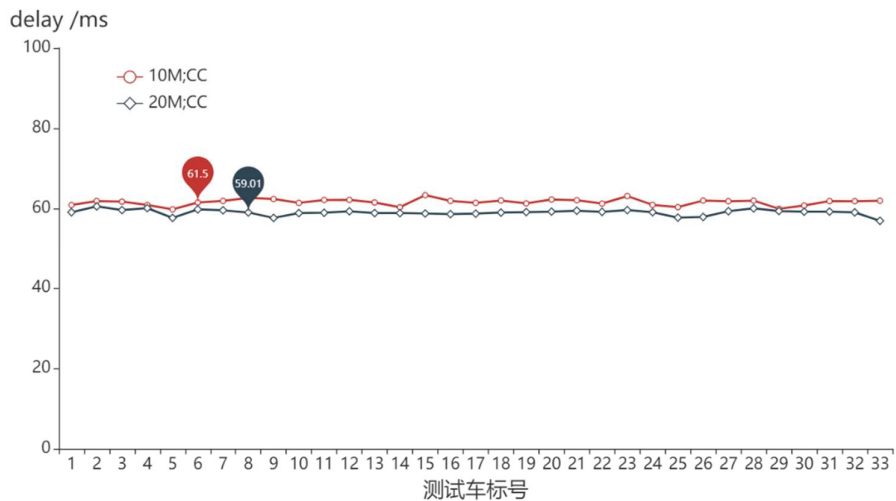


图 59：测试车的平均传输时延（标注点表示每个 case 的平均值）

不同的资源池配置下，OBU 设备间的传输时延无明显变化，均保持在 60ms 左右。

OBU 接收 RSU 四种消息的时延：

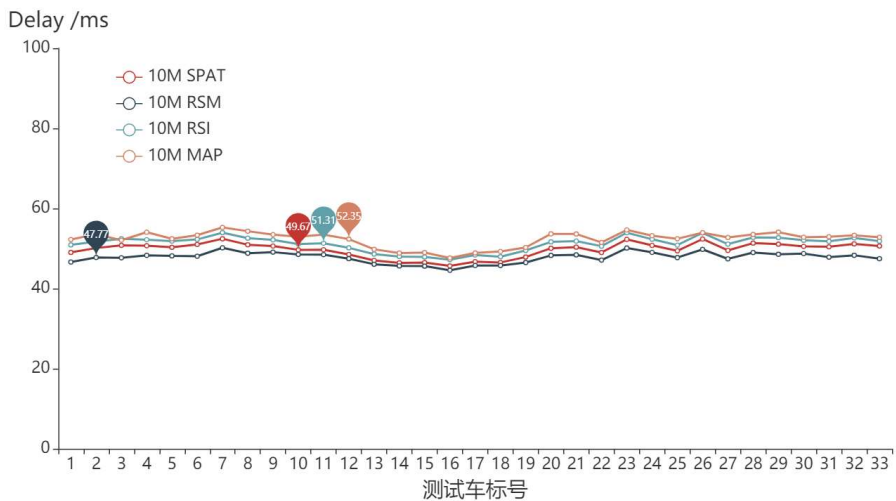


图 60：测试设备与 RSU 使用 10MHz+10MHz 双资源池（标记点表示平均值）

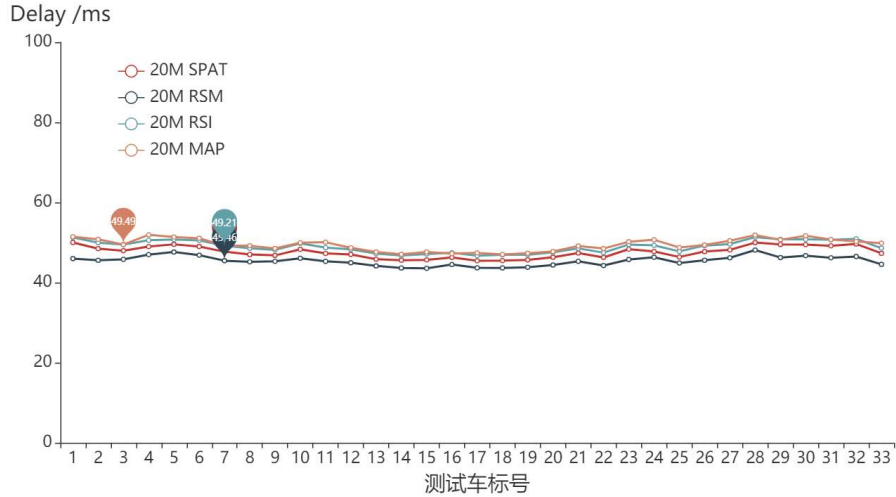


图 61：测试设备与 RSU 混用 20MHz 单资源池（标记点表示平均值）

RSU 和 OBU 使用 10MHz+10MHz 双资源池，或者 RSU 和 OBU 混用 20MHz 单资源池下，OBU 接收 RSU 消息的时延均保持在 50ms 左右。不同的 RSU 消息之间，随字节数增加，接收时延增加，但仅相差 1ms 左右。资源池配置对 RSU 消息的传输时延无明显影响。

6.8.5. 小结

信道资源的增加对 OBU 设备间通信性能的影响较为明显。10MHz+10MHz 双资源池下，开启拥塞控制后，位于直行道路中间拥挤路段（约有 110 台设备，100 米半径范围内）的测试车，监听信道的 CBR 最高可达到 75.6%，而在 20MHz 单资源池下，测试车监听信道的 CBR 最高为 49.1%。发送消息时可用带宽的扩展，丰富了测试车在每个发送时刻可选择的信道资源，因此测试车接收数据包的丢包率得到改善。10MHz+10MHz 双资源池时，开启拥塞控制后，V2V 通信平均 PER 为 26.9%，道路中心拥挤处（约 110 台 OBU 设备），测试车接收数据包的丢包率最高达到 36.68%。在 20MHz 单资源池配置下，同样的拥挤路段，测试车接收数据包的丢包率平均值为 4.04%，最大值为 6.52%。

对于 RSU 的资源池分配，RSU 和 OBU 使用 10MHz+10MHz 双资源池时，RSU 发送的消息不易受到同频段的干扰，具有较好的覆盖范围，测试车接收 RSU 消息的丢包率平均在 2% 左右。RSU 和 OBU 混用 20MHz 单资源池时，与 RSU 相距 100 米左右范围内的测试车可以很好的收到 RSU 的消息，平均丢包率仅为 0.65%，然而超过 100 米左右的范围，受到同频段 OBU 发送消息的干扰，RSU 发送的消息被成功解调的概率降低，丢包率上升。

对比单、双池方案可以看到，单池方案在频率使用效率、适应频率弹性需求以及前向兼容性等方面均优于双池方案。实际测试显示 V2V 在双池方案下 PER 性能非常差，无法满足 10% PER 的设计目标，已背离汽车和交通行业采用 LTE V2X 技术的初衷。

7. 总结

本次 C-V2X 大规模测试对真实道路拥挤场景下 OBU 设备间的通信进行了模拟，重点关注交叉路口和直行道路两种典型交通场景下的通信性能。拥塞控制、信道配置、车辆密度对通信性能的影响亦在本次测试之内，旨在提供更加详细、全面的数据指导。RSU 的通信覆盖也是测试的一个重点，针对 RSU 信道分配产生的通信性能差异，结果分析部分也做出了讨论。此外对移动车辆的通信进行了初步测试，希望为后续阶段的测试打好基础，提供经验。

对比单、双池方案可以看到，单池方案在频率使用效率、适应频率弹性需求以及前向兼容性等方面均优于双池方案。实际测试显示 V2V 在双池方案下 PER 性能非常差，无法满足 10% PER 的设计目标，已背离汽车和交通行业采用 LTE V2X 技术的初衷。本次测试为以后的单、双池技术路线选择提供了实际测试数据参考。

参考文献

1. YD/T 3340-2018 《基于 LTE 的车联网无线通信技术 空中接口技术要求》
2. YD/T 3707-2020 《基于 LTE 的车联网无线通信技术 网络层技术要求》
3. YD/T 3709-2020 《基于 LTE 的车联网无线通信技术 消息层技术要求》
4. 《基于 LTE-V2X 直连通信的车载信息交互系统技术要求》（讨论稿）
5. CSAE 159-2020、T_ITS 0110-2020 《基于 LTE 的车联网无线通信技术 直连通信系统路侧单元技术要求》

致谢

诚挚感谢如下人员对本白皮书做出的贡献：

北京星云互联科技有限公司

王易之

高通无线通信技术（中国）有限公司

李俨、陈书平、高路、殷悦