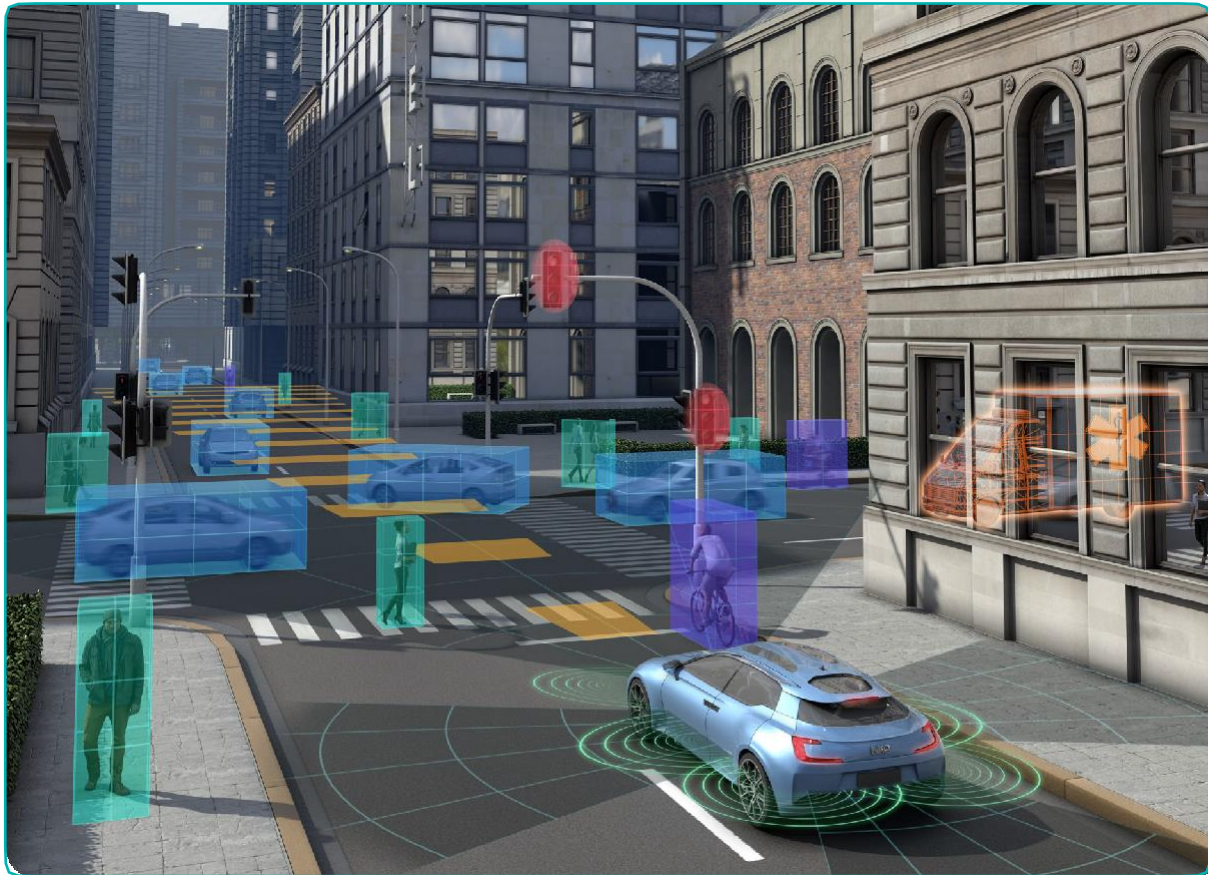


# IEEE802.11p 将先于 LTE-V2V 用于安全应用

Alessio Filippi, Kees Moerman, Vincent Martinez and Andrew Turley – 恩智浦半导体公司.

Onn Haran and Ron Toledano – Autotalks. 公司



## 执行官概要

车到车通信正在显著吸引人们的注意力，因为它能极大地减少道路交通事故，改善移动性，实现高层次的汽车自动化。支持安全关键应用是车到车通信的核心，多年来，V2X 选择的技术一直是 IEEE802.11p。最近，在移动通信标准化组织 3GPP 的积极推进下，一种旨在满足 V2X 应用的新标准开始启动。由于成千上万的道路使用者的安全将取决于这些技术的性能，因此对它们进行对比就显得相当重要。

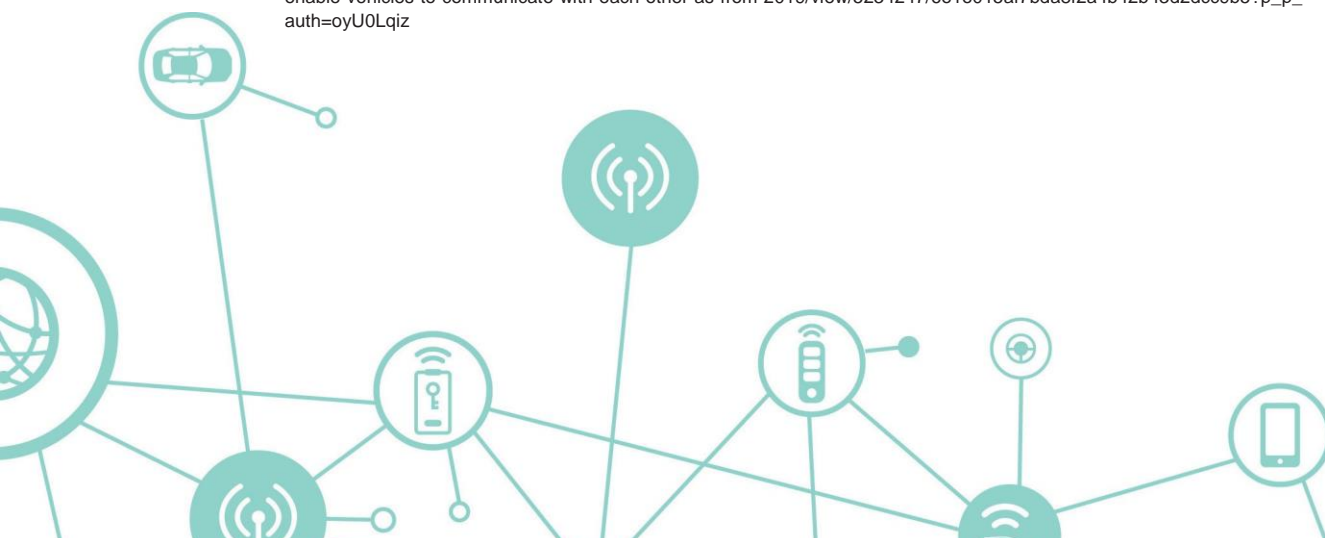
在比较 IEEE802. 11p 和 LTE-V2X 之前有几个重要的相关事实需要强调：

- IEEE802. 11p 现在已经可以商用，LTE-V2X 还不行[4]。目前市场上有多家芯片供应商可以提供基于 IEEE802. 11p 的产品。有些一级供应商还有完整的解决方案。相比之下，目前市场上还没有可商用的 LTE-V2X 产品，很可能还需要多年的时间才能见到完整且验证过的解决方案。曾经许诺过的 V2X 5G 版本甚至需要更长的时间才能浮出水面。
- 许多上路的汽车中已经安装有 IEEE802. 11p。最终用户现在就可以购买到装备有 IEEE802. 11p 技术的汽车（比如通用的凯迪拉克<sup>1</sup>）。
- V2V NPRM 已经发布[1]。说明美国政府有明确意向要全面推进 IEEE802. 11p 的部署工作，也说明 IEEE802. 11p 技术已可满足安全性需求并且通过了测试验收。
- IEEE802. 11p 大批量部署可能很快开始。作为全球最大汽车制造商之一的大众汽车公司已公开宣布，从 2019 年开始将在他们的首批车系中装备 IEEE802. 11p 技术<sup>2</sup>。

蜂窝领域一直在鼓吹 v2x 的部署应该等到蜂窝技术准备好并通过测试，而全然无视在验证 IEEE802. 11p 对安全关键应用的适用性方面作出的投资和现场测试工作。更具体地说，蜂窝领域声称 LTE-V2X 可以提供：

- 强大的蜂窝生态系统。该系统借助多年来的丰富经验可以向全球提供付费服务和成熟的技术。虽然这是正确论点，但它指的是采用蜂窝技术的娱乐服务。而设备与基站之间的通信与处于动态环境中的设备与设备间通信有根本性的区别；
- 双倍的性能[6]。然而，就像下文要指出的那样，在重要的 V2V 使用案例中，IEEE802. 11p 的性能完全超过了 LTE-V2X；
- 最小的附加成本。这是有问题的，因为对安全关键应用的支持强烈地表明需要将这些技术与娱乐软硬件分离开来。因此，LTE-V2X 很可能在物理上与蜂窝调制解调器分离；

1 <http://media.cadillac.com/media/us/en/cadillac/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2017/mar/0309-v2v.html>  
2 [https://www.volkswagen-media-services.com/en/detailpage/-/detail/With-the-aim-of-increasing-safety-in-road-traffic-Volkswagen-will-enable-vehicles-to-communicate-with-each-other-as-from-2019/view/5234247/6e1e015af7bda8f2a4b42b43d2dcc9b5?p\\_p\\_auth=oyU0Lqiz](https://www.volkswagen-media-services.com/en/detailpage/-/detail/With-the-aim-of-increasing-safety-in-road-traffic-Volkswagen-will-enable-vehicles-to-communicate-with-each-other-as-from-2019/view/5234247/6e1e015af7bda8f2a4b42b43d2dcc9b5?p_p_auth=oyU0Lqiz)



- 演进路线图和未来不会过时的技术，因为通过 3GPP 会议的全面测试机制可以持续地改进这种技术。虽然这也许是真的，但每隔 12 到 15 个月升级一次标准并不能保证旧汽车能够与新汽车通信。这与创建一个稳定通用的国际标准来推动 V2X 技术成功的需求是背道而驰的。

这种建议的 LTE-V2X 技术源自蜂窝上行链路技术，与目前的 LTE 系统保持着很多相似性：比如帧结构、子载波间距、时钟精度要求以及资源块概念等。这些属性不是很适合汽车应用场景，只是继承自现有的蜂窝技术。因此 LTE-V2X 要满足车到车通信的特殊应用要求比较吃力。

从技术上讲，LTE-V2X 在没有网络覆盖的情况下会出现问题。它有严格的同步要求（章节 2.1），否则将不能正确地从相邻和附近的发射器接收消息（章节 2.3），并且通信距离也将受到限制（章节 2.4）。另外，它所采用的资源分配机制无法正确处理具有不同长度的消息（章节 2.5），而多用户访问机制也不能很好的处理广播消息（章节 2.6）或消息冲突（章节 2.9）。LTE-V2X 的重载设计也会导致更高的开销（章节 2.7 和 2.8）。

在商用方面，LTE-V2X 无法利用汽车中已有的标准 LTE 调制解调器。不同的安全要求（章节 2.10）和技术需求（章节 4.1）强烈建议 LTE-V2X 的安全关键域要与标准 LTE 调制解调器的娱乐域分离开来。严格的同步要求（章节 3.2）也会显著地增加 LTE-V2X 硬件的成本。

从发展战略上看，LTE-V2X 也许不是用于安全关键应用的最佳技术，因为其更新周期不能匹配汽车的开发周期（章节 4.1）。虽然当前版本的 LTE-V2X 还没有完成现场测试，但 3GPP 组织已经开始开发 LTE-V2X 的新版本。下一代的 IEEE802.11p 也在考虑中了（章节 4.2.1），希望利用众多大规模现场试验的经验测试安全关键应用。

我们的结论是，IEEE802.11p 技术是即使在没有网络的情况下还能支持安全关键应用的理想之选。如果有蜂窝基础设施，LTE-V2X 是一种可行的替代方案，可以为娱乐服务提供更为成熟的生态系统。这种双赢态势要把重点放在每种技术的最强项上，共同努力提供最佳的车到车通信解决方案，并继续为安全关键应用部署 IEEE802.11p，同时确保新的 LTE-V2X 技术能与之共存。

## 1 引言

自从 10 年前推出以来，V2X 选择的技术一直是 IEEE802.11p<sup>3</sup>，这种技术已经完成了标准化、产品实现和全面的测试。最近，一种面向 V2X 应用的新标准正在移动通信标准化组织 3GPP 的推进下开始启动。成千上万道路使用者的安全将依赖于这些技术的性能；因此对政策制订者、汽车制造商和更宽范围的汽车生态系统来说首当其冲的是要对这些技术进行全面的比较。

### 1.1 V2X 的功能目标

通过一起工作和共享信息使得交通运输更安全、更环保和更有趣是极具吸引力的。与这个概念有关的技术——统称为合作性智能交通系统（C-ITS）承诺要减少交通拥堵、减轻交通对环境的影响并显著减少致命交通事故的数量。

支撑 C-ITS 的一种关键技术是无线通信，覆盖车到车（V2V）通信、汽车到摩托车（V2M）通信、汽车到基础设施（V2I）通信以及基础设施到汽车（I2V）通信。这些无线事务被总称为汽车到万物或 V2X 通信。

V2X 技术将支持许多与安全相关的、也可能与安全无关的 C-ITS 系统应用场合。它需要在非常动态的环境中可靠地工作，在发射机和接收机之间具有相对较高的通信速度，并且支持在高速公路、拥挤的城市路口和隧道等安全相关应用中提供极低的延时。

### 1.2 IEEE802.11p

IEEE802.11p 设计满足每种 V2X 应用要求和最严格的性能规范。1999 年，美国联邦通信委员会（FCC）在 5.9GHz 区段内留出 75MHz 频谱给了 V2X。IEEE802.11p 标准因此就工作在这个频率范围内。

IEEE802.11p 是 IEEE802.11a（WiFi）的扩展，工作在自组织网络模式，不需要 BSS（基本服务集，WiFi‘基站’）。它针对存在障碍物的移动条件进行了优化，能够处理因为相对速度高达 500km/h 而产生的快速变化的多径反射和多普勒频移。典型的视距（LoS）通信距离是 1km，但 IEEE802.11p 的主要目标是‘能够看到转角’（非视距，NLOS），因为汽车中没有其它传感器可以做到这一点。事实表明，借助世界最先进的技术，作为目前商用化的现货产品通常可达几公里的更大范围。当 IEEE802.11p 多址访问机制（冲突避免的载波侦听多址访问协议，CSMA-CA 协议）与分布式拥塞控制（DCC）结合在一起使用时可以高效地应付高密度应用场合。



图 3：正式命名的 IEEE802.11 工作在 BSS 范围之外，在美国也称为 DSRC。

标准化工作从 10 多年前就开始了，最终草案是 2009 年批准的，并且自从批准后做了大量的测试和验证工作。simTD 项目[8]是第一个大规模现场测试项目，开始于 2009 年，当时使用了 100 多台汽车。从那时开始到现在，完成商用化 IEEE802. 11p 产品的现场试验项目有几十个，而且还有许多仍在进行着。参考文献[8-13]就提到了其中的一些项目。最大的 IEEE802. 11p 先导项目之一是由 USDOT（怀俄明州，坦帕和纽约市）资助的，包含超过一万多辆实现了各种应用的汽车，投资总额超过 4500 万美元[13]。巨大投资用于保证这种技术的质量和可靠性。

多家半导体公司设计和测试了通过汽车资格认证的 IEEE802. 11p 兼容产品。多家供应商可以提供大量的硬件和软件产品，从而组成了一个丰富的生态系统。市场上有许多型号汽车采用了 IEEE802. 11p 技术，还有其它型号汽车正计划很快发布，比如：

- 通用的凯迪拉克 CTS 汽车装备有 IEEE802. 11p<sup>4</sup>；
- 丰田在日本国内就有接近 10 万辆汽车装备有 IEEE802. 11p；
- 大众选择了 IEEE802. 11p 技术来支持 V2X 应用<sup>5</sup>。

USDOT 宣布，根据收集到的证据证明，IEEE802. 11p 技术可以显著减少道路上的碰撞事故数量。专家们预期 USDOT 即将进入能够为了安全而强制要求在所有新的轻便型汽车中采用 IEEE802. 11p 技术[14] 的正式流程。

### 1.3 LTE-V2X

LTE-V2X 是一种相对较新的技术（首次讨论发生于 2015 年），是 3GPP Rel-12 设备到设备（D2D）功能的扩展，本身依赖于使用 LTE 上行链路传输和上行链路频谱资源实现设备间的直接通信。V2V 基础安全功能最早出现在 LTE Rel-14 规范中。

LTE-V2X 设计时就考虑了多种部署场景，因此提出了以下要求：

1. 能够在有或没有 eNB（‘基站’）覆盖的条件工作。Rel-14 中的 LTE-V2X 基于的是 PC5 接口，允许用户在有或没有网络覆盖的条件下彼此间直接广播消息。在蜂窝覆盖下的操作可以利用同步网络的所有好处，其中的中心协调、调度和管理是用一系列基站实现的。然而需要注意的是，存在这种装置无法工作的许多情景，比如覆盖率很差的农村地区、高速公路以及会发生频繁切换基站的快速移动用户。LTE-V2X 技术必须能够在没有基站覆盖的区域实现可靠的工作；

4 <http://media.cadillac.com/media/us/en/cadillac/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2017/mar/0309-v2v.html>  
5 [https://www.volkswagen-media-services.com/en/detailpage/-/detail/With-the-aim-of-increasing-safety-in-road-traffic-Volkswagen-will-enable-vehicles-to-communicate-with-each-other-as-from-2019/view/5234247/6e1e015af7bda8f2a4b42b43d2dcc9b5?p\\_auth=oyU0Lqiz](https://www.volkswagen-media-services.com/en/detailpage/-/detail/With-the-aim-of-increasing-safety-in-road-traffic-Volkswagen-will-enable-vehicles-to-communicate-with-each-other-as-from-2019/view/5234247/6e1e015af7bda8f2a4b42b43d2dcc9b5?p_auth=oyU0Lqiz)

2. 在专用的免许可载波或有许可的频谱条件下独立工作；
3. 增强 D2D 空中接口功能，以便支持低延时、高密度和高速度。

为了满足提高了的要求，Rel-14 LTE-V2X 引入了新的 Sidelink 传输模式（传输模式 3&4），参考表 1。由于引入了低延时传输技术，因此这些模式有别于 Rel-12 D2D 模式（传输模式 1&2），改进了对更高速度和新的分布式信道访问机制的支持[15]。

	调度方法	信道访问	用例	版本
模式 1	eNB	受 eNB 控制	公共安全 VoIP	LTE Rel-12
模式 2	分布式	随机，带盲式重传	公共安全 VoIP	LTE Rel-12
模式 3	eNB	受 eNB 控制	V2X	LTE Rel-14
模式 4	分布式	检测，带半永久传输	V2X	LTE Rel-14

表 1: LTE-Sidelink 通信中可用的操作模式。

尽管近年来业界作了很大的贡献和标准化工作，但 LTE-V2X 标准还远未成熟，许多技术课题仍在讨论中，最近举行的 RAN 会议期间大家还一致同意做了很多显著的标准修改。与 V2X 有关的维护修改请求（CR's）数量很大，使得芯片制造商在确定功能集、进入可互操作性测试阶段、固定软硬件架构和投产方面面临很大的挑战。汽车制造商也质疑其实际性能和对安全关键用例的支持。此时此刻，LTE Rel-14 标准的实际性能几乎是未知的。

对安全关键应用来说最相关的也是最具挑战性的 LTE-V2X 操作模式是 Sidelink 传输模式 4，这个模式可以被看作是自组网模式。与 IEEE802.11p 技术的比较重点就放在这个模式上。

## 2 LTE-V2V 模式 4 和 IEEE802.11p 的比较

IEEE802.11p 和 LTE-V2X 都采用众所周知的正交频分复用（OFDM）调制技术，其中的数据块安排用等距的子载波传输。然而，

	IEEE802.11p	LTE-V2X
多用户分配	每个符号一个用户	多用户共享同一个符号
同步要求	异步	严格同步
OFDM 参数	短符号周期	很长的符号周期
信道访问机制	CSMA-CA	基于检测技术的 SPS 传输

表 2: IEEE802.11p 和 LTE-V2X 设计参数的区别。

如表 2 所示那样，它们选择了非常不同的参数。LTE-V2X 继承了很多 LTE 的机制，适合具有功率控制、同步调整功能的集中式（即非自组织）和同步网络，并且工作在低速到中等速度。正如后面章节将要讨论的那样，它不太适合自组网通信模式，无法应用于多个重要的 V2X 使用场合。

## 2.1 同步

与 IEEE802.11p 相比，LTE-V2X 对频率误差和时序误差更为敏感。在不精确的频率同步状态下，残留频率误差会导致载波差拍干扰（ICI）。在 LTE-V2X 中，OFDM 的子载波间距要比 IEEE802.11p 的子载波间距近 10 倍，因此相同的绝对频率误差在 LTE-V2X 中的影响要远大于在 IEEE802.11p 中的影响。这将导致 LTE-V2X 性能会受限，相同的绝对频率误差将产生大 100 倍的干扰功率[10]。表 3 对 IEEE802.11p 和 LTE-V2X 的时序精度和频率精度要求进行了量化。

	时序精度		频率精度	
	允许的误差 [μsec]	参考	允许的误差 [ppm]	参考
IEEE802.11p *	± 1000	绝对 (UTC)	± 20	绝对
LTE-V2X **	± 0.39	同步源	± 0.1	同步源

表 3：传输精度要求。

\* 时序精度在针对信道切换的 IEEE 1609.4 标准中有规定

IEEE802.11p 的操作对时序没有依赖性；频率精度在 IEEE802.11 中有规定

\*\* 时序精度在 3GPP TS 36.133 中有规定；频率精度在 3GPP TS 36.101 中有规定

有两个明显的主要区别：

1. LTE-V2X 要求要严格得多；
2. LTE-V2X 的要求与用户的同步源有关。当用户使用不同的同步源时，比如锁定到不同的基站，同步的要求将无法实现，从而影响汽车彼此之间的通信性能。

为了满足这些同步要求，LTE-V2X 用户需要依赖于全球导航卫星系统（GNSS）信号。然而，这又会带来其它挑战。举例来说，事实上 GNSS 信号在隧道、地下停车场和城市峡谷等位置有可能丢失或不够可靠。在没有 GNSS 覆盖的情况下，在要求的精度范围内保持同步取决于用户的本振漂移。精度越高，就像严格子载波间距要求的那样，成本就越高。在没有可靠的 GNSS 信号或根本没有 GNSS 信号的情况下，用户不得不选择替代源实现同步，这会影响通信的可靠性。

IEEE802.11p 工作时不需要依靠 GNSS 信号。IEEE1609.4 也需要 GNSS 信号，但只用于从一个信道切换到另一个信道，也就是说需要低得多的时序和频率精度。

## 2.2 高速状况

移动中的汽车在传输信号时会发生多普勒频移，这个频移可以被看作（除了同步误差之外）额外的频率误差。在高速状况下，这些多普勒频移可能两倍于甚至四倍于同步误差（随着汽车相对速度的增加而增加），并成为主要部分。

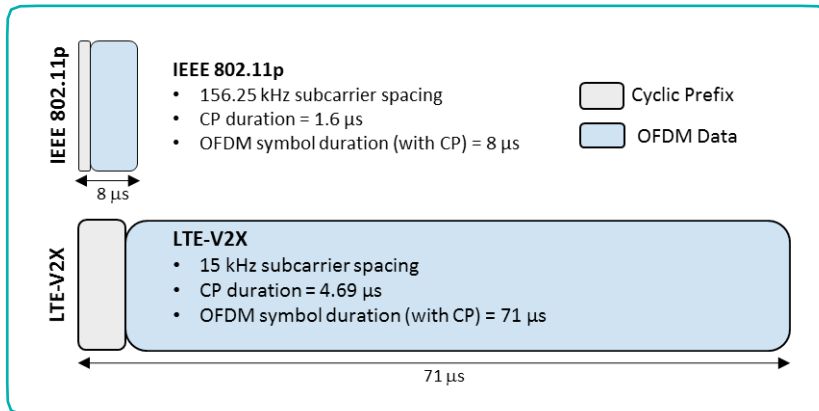


图 1: IEEE802.11p  
(上面)和 LTE-V2X  
(下面)的 OFDM 同  
比例符号。

如图 1 所示，LTE-V2X 中的符号周期要比 IEEE802.11p 长 10 倍，这会限制最大可检测的多普勒频移，并因此对速度有最大值的限制（除了跟踪快速变化的信道以外）。事实上，在 3GPP 仿真结果内已经观察到了这种缺点，即当速度超过 140km/h 时，就不再能可靠地检测消息，性能也很差[19]。3GPP 解决这个问题的方法是引入复杂的处理方法，但该方法被证明不够强大[20]；或者减少调制和编码方案（MCS），但并不能解决问题。建议修改先导符号图案或缩短符号周期[21]是不被接受的，因此最终 LTE-V2X 被严格限制用于速度在 140km/h 以下的的应用。

而 IEEE802.11p 受益于很短的符号周期和精选的符号先导图案，因此对高速时的性能没有任何限制。虽然 LTE-V2X 受限于工作在 140km/h 以下，但 IEEE802.11p 性能在 250km/h 甚至更高的速度时都可圈可点。

## 2.3 近-远端问题

LTE-V2X 对于用户接收来自两个或更多个具有不同功率电平的发射机的信号场合非常敏感，即近-远问题，如图 2 所示。这种功率差可能发生在两个相邻的发射机其中一个被阻挡的时候。IEEE802.11p 允许每个 OFDM 符号传输单个用户消息，而接收机可以针对每个用户单独以最佳的方式设置其参数，比如自动增益控制器（AGC）、时间偏移估计和频率偏移估计等，因为符号是不共享的。



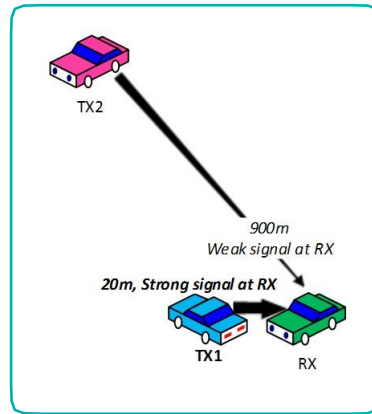


图 2: 近-远问题:  
接收两个并发信号。

LTE-V2X 允许用户共享相同 OFDM 符号内的资源 (图 3), 但接收机只根据单个组合信号设置其自动增益控制器的增益值。因此, LTE-V2X 接收机在存在强信号的情况下接收弱信号的能力是受限制的<sup>6</sup>。但弱信号的重要性可能比强信号大。举例来说, 强信号可能来自与安全决策的关联度较低的车辆后面的发射机, 而弱信号也许来自可能会引起真正风险的正在接近的发射机。

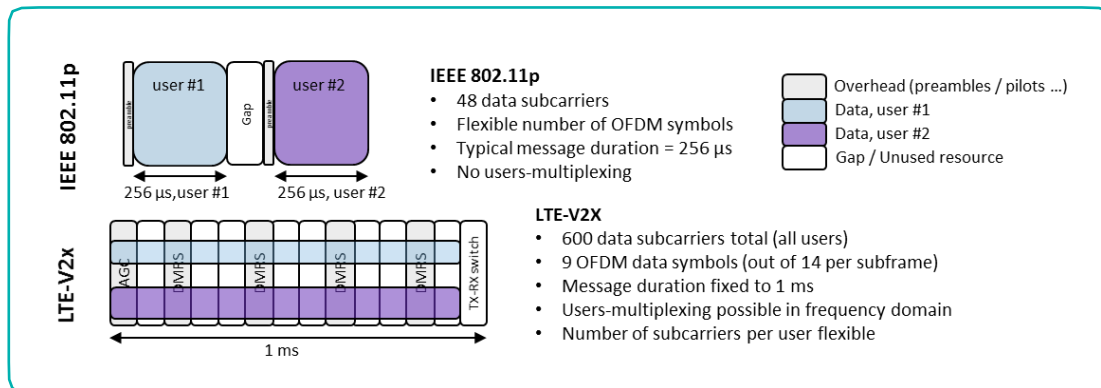


图 3: IEEE802.11p 和 LTE-V2X 的帧结构, 并附带有资源分配例子。有两个用户用 QPSK、代码率为 $\frac{1}{2}$ 的技术发射 192 字节的 CAM 消息。留意在 LTE-V2X 时的符号共享。

为了解决近-远问题, LTE-V2X 引入了地球分区概念, 其中包括根据用户所在的绝对地理位置建立空间隔离, 不同位置的用户只能限于从特定的时间-频率集中选择发射用的资源。这种解决方案当然非常有趣, 但需要进行现场验证, 以评估不均匀分布的用户以及他们快速移动位置带来的影响。

6 因为实际动态范围的限制

## 2.4 最大通信距离

比较 V2X 技术的一种方法是比较在室外相同条件下测试得到的实际性能。IEEE802.11p 已被证明在各种现场试验中可以达到很大的通信距离，在高速公路情况下已经能够达到几公里[8]。遗憾的是，LTE-V2X 现场试验还没有可用于比较的结果。但 LTE-V2X 同步概念对用户之间的通信距离有限制，反映在分配给循环前缀（CP）的不同角色中，见表 4。

	IEEE802.11p	LTE-V2X
循环前缀时长	1.6 $\mu$ s	4.69 $\mu$ s
循环前缀目的	延时扩展	时序误差，传播延时，延时扩展

表 4: IEEE802.11p 和 LTE-V2X 中的循环前缀（CP）的时长和目的。

在 LTE-V2X 这样的同步系统中，所有用户的信号必须在时间上同步到达接收机，以防止连续的 OFDM 符号之间出现码间干扰。在实际应用中这种要求是无法满足的，因为要么来自不同发射机的信号传播时间不相等，要么每位用户用于自己传输的时序基准不相等。当用户处于覆盖范围内、并将 eNB 用作他们的时序基准（在 GNSS 不可用的情况下）时就是这样的例子。在这种情况下，每位用户的传输时间都是基于自己的下行链路时序基准<sup>7</sup>。自然而然的，一些用户靠 eNB 近一些（具有较短的传播延时），一些用户比较远。近的用户要比远的用户更早地开始传输，而邻近用户的接收（RX）用户也会设置相应的接收窗口。远用户的传输将在往返传播延时之后到达接收机。在远程发射机太远的情况下，它可能到达的太晚而超出接收窗口，导致接收侧无法检测到消息，见图 4。

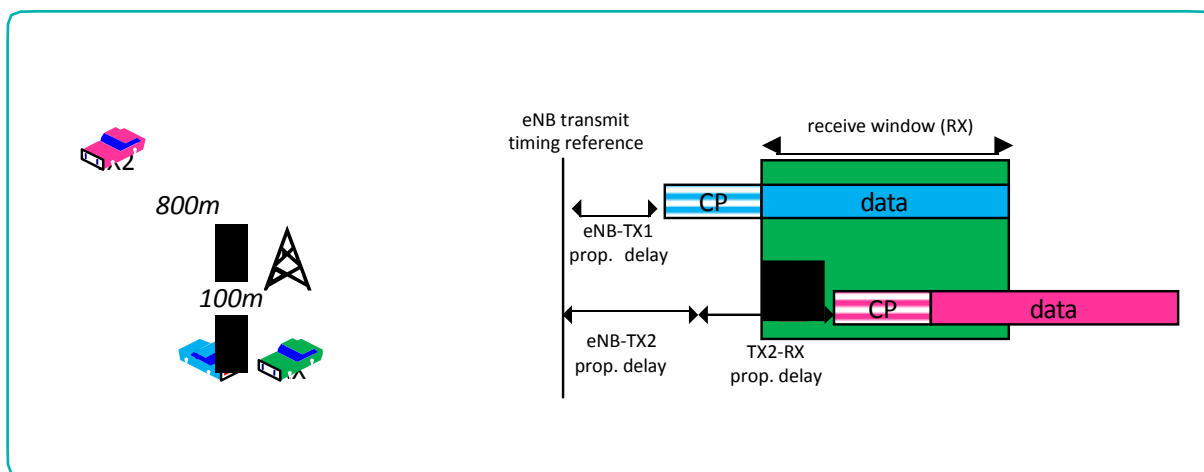


图 4: 距离对循环前缀的影响。

<sup>7</sup> 基于的是从 eNB 检测到的下行链路传输。

从图中可以看出，对通信距离有限制，超出这个范围接收机将无法检测到远用户发的消息。表 5 列出了 LTE-V2X 可以实现的最大距离。某些情况下不能满足 [17] 中定义的 Do-No-Pass-Warning 消息提出的 NPRM 要求。

条件	时序基准源	
	GNSS	eNB
理想（没有时序误差，也没有延时扩展）	1407m (1 CP)	703.5m
实际（有时序误差和 1us 的延时扩展）	873m	436.5m

表 5：基于时序基准源的 LTE-V2X 可以达到的距离。

## 2.5 资源分配

实际的 V2X 业务图案是用具有可变大小的数据包来表征的。诸如（由 ETSI 规定的）CAM 和基本安全消息（BSM, 由 SAE 规定）等消息组是周期性（通常是每隔 100ms）产生的，包括比如地理位置、速度、朝向等汽车状态信息和其它相关信息。汽车偶然也会将一组路径预测和/或近来的路径历史点附加到这些消息上。点的数量取决于道路状况，但在每个点用大约 10 个字节描述的情况下，这种增加的信息就会很容易在负荷中占据额外数 10 个字节。另外一个改变消息长度的例子与安全有关：对 BSM 来说，整个安全证书每隔 500ms 发送一次，会给默认的消息长度再增加 100 个字节。

IEEE802.11p 的资源分配方案可以很轻松地支持可变数据包大小。一旦某位用户占用了信道它就会自己用一个 OFDM 符号的分辨率（即 8 微秒）判断传输时长，以便负载传输时间变得更短/更长。在 LTE-V2X 中，用户会以半永久的方式保留资源，也就是说在知道确切的数据包大小之前。在应用层的负荷大小还没有确定前就提前保留资源会导致资源大小的超分配（没有效率）或欠分配（要求更密集的编码，降低对消息的检测概率）。不管怎样，适合 IEEE802.11p 的简单资源分配机制在处理可变负荷尺寸时会更加高效。

## 2.6 半双工

从图 3 可以明显看出，LTE 下的两个用户可以使用不同的频率资源在相同的 OFDM 符号中传送消息。在某一给定时刻，用户要么发送，要么接收，因为他们的无线系统工作在半双工模式。这样，两位用户即使靠得很近也不会收到彼此的消息，从而错过安全关键决策所必需的信息。他们不得不等待直到其中一位或两位为传输选中新的资源。

## 2.7 物理层效率

重载设计的 LTE 波形和帧格式在单用户下将转换为更高的开销，详见下面这张表。

	LTE-V2X	IEEE802.11p
数据消息	20 个资源模块 (PRBs)	50 个符号
开销数据	5 PRBS (2 SA+3 用于 DTF 预编码器)	5 个符号 (PLCP+SIGNAL)
循环前缀	4.69 $\mu$ s	1.6 $\mu$ s
导频	4 个符号 (DMRS)	4 个子载波
额外开销	保护周期 (1 个符号)	服务域, 尾部和填充
总开销, 物理层	52.55%	33.97%

表 6: IEEE802.11p 和 LTE-V2x 在发送一个 CAM 消息时的开销比较。

## 2.8 容量

V2X 适合用于高业务密度的场合。容量的定义是在某个区域内所有车辆能够在不竞争相同资源的条件下实现通信的能力，因为竞争最终将导致通信距离的缩短和延时的增加。在等效条件下 IEEE802.11p 和 LTE-V2X 具有相似的容量和距离。

表 7 表明，LTE-V2X 和 IEEE802.11p 的容量基本相同，一个给定 10MHz 的信道可以在 1ms 时间内容纳大约 2 条消息。

	LTE-V2X	IEEE802.11p
传输时长	固定, 1msec	控制 (PLCP) = 40 $\mu$ sec 数据 (PSDU) = 50 个符号 = 400 $\mu$ sec 总计 = 440 $\mu$ sec
占用带宽	控制 (SA) = 2 PRB = 360 kHz 数据 = 2424 PRBs = 4.32 MHz 总计 = 4.68 MHz	固定, 10 MHz
容量	$\approx$ 2 条消息 / 1ms	$\approx$ 2 条消息 / 1ms

表 7: 容量比较。

## 2.9 消息冲突

在一条道路的指定区段会有多个用户，每个用户以有规律的间隔发送消息。IEEE802.11p 通过实现 CSMA-CA 协议解决潜在的冲突问题，它会在开始新的传送之前检查无线信道是否在使用状态。LTE-V2X 没有等效的机制，如果发生冲突也不会被检测到。两个用户可能使用相同的资源块发送消息。在重新选择资源之前资源会通过半永久分配技术保持用于多次传输。因此这两个用户的多次传输将丢失。

LTE-V2X 通过增加一定程度的随机性在用户之间重新选择事件时间来减轻这个问题，但不能完全解决冲突风险。

举例来说，两辆汽车都在接近交叉路口。一旦进入有效通信范围，IEEE802.11p 将确保无冲突操作，必要时会发出警告。LTE-V2X 则无法这样做，从而白白失去宝贵的时间。

## 2.10 网络安全保护

ISO26262 中针对上路汽车定义的功能性安全认证提出了采取验证和确认措施来确保达到足够和可接受的安全水平的要求。风险和危险分析通过衡量威胁生命的潜在可能性来确定汽车安全完整性水平 (ASIL) 等级。由于 V2X 可能控制汽车，比如在车队应用中，因此可以假设 V2X 要求 ASIL B 等级的 ISO26262。达到 ASIL B 等级要求付出额外的成本，因此强烈建议将非安全关键域和安全关键域在软件和硬件方面分隔开来。如果系统的非安全部分没有被隔离，那就也要进行 ISO26262 认证，那将变得特别困难，成本也会特别高。另外，域的隔离有助于更强大更好地防止潜在的网络攻击，见图 5。硬件和软件的隔离清楚地表明，无法通过简单地重复使用标准 LTE 调制解调器覆盖 LTE-V2X 应用空间。

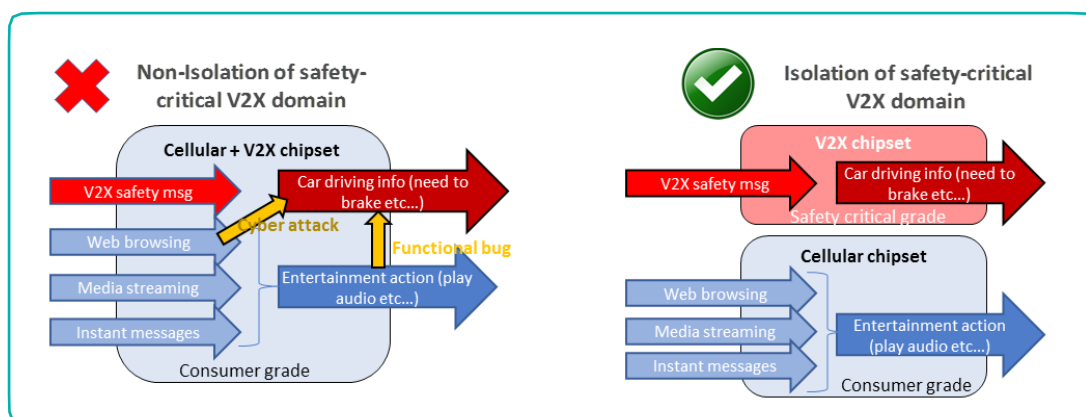


图 5：安全域和非安全域之间的隔离所带来的功能性安全和网络安全好处。

高度复杂的 LTE-V2X 解决方案意味着比 IEEE802.11p 解决方案更高的成本。因此用 LTE-V2X 满足安全应用将变得更加昂贵。

### 3 成本因素

#### 3.1 无法重复使用标准 LTE 调制解调器

标准 LTE 调制解调器芯片级只解码从基站接收到的每个传输时间间隔单个的传输。在 LTE-V2X 中，除了解码基站数据外，芯片组还要求解码每个传输时间间隔并发的多个传输（来自不同的用户），因此需要增加数量较多的硬件。标准 LTE 调制解调器无法重复使用，因为 LTE-V2X 中的波形和信号格式有别于标准 LTE。

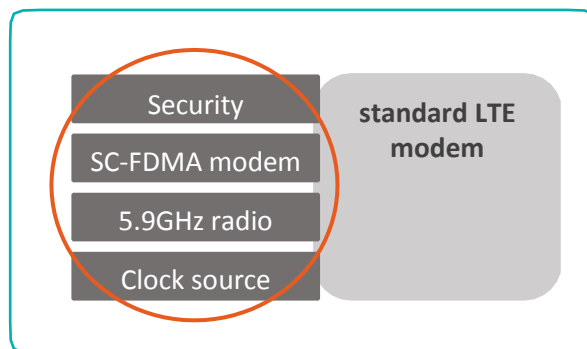


图 6：标准 LTE 调制解调器要求的额外块。

另外还要增加一个 5.9GHz 无线链，以及稳定的 GNSS 同步时钟源，见章节 2.1。

从成本方面考虑，LTE-V2X 和 IEEE802.11p 系统只有调制解调器和时钟源方面有区别，而更高的层、人机界面以及安全用例等方面都是相同的。实际上，IEEE802.11p 调制解调器并不比在蜂窝芯片组旁边增加 LTE-V2X 产生的额外成本贵，因为 LTE-V2X 时钟源和认证成本的影响也很大（AEC-Q100 对蜂窝芯片级成本的影响）。因此，即使没有域隔离，LTE-V2X 也不比 IEEE802.11p 便宜。

#### 3.2 时序和时钟精度

LTE-V2X 对精确同步的额外敏感意味着不切实际的参考时钟，见表 3，因为时钟源的精度与性能和鲁棒性有关。对时钟元件在高温以及高应力下的温漂以及频率稳定度的苛刻要求，最终会造成成本上升。

对 IEEE802.11p 来说，精度要求几乎与常用的 WLAN 设备没有什么差别，因此同步精度要求不会影响 IEEE802.11p 系统的成本。

即使 GNSS 覆盖信号暂时比较弱，LTE-V2X 应该也能长时间保持相同的精度水平。当 LTE-V2X 不能依赖 GNSS、而且找不到另外一个与 GNSS（间接或直接）同步的用户时，LTE-V2X 系统仍必须以规定的 0.1ppm 频率精度产生和发送 V2X 消息。汽车要满足这个精度要求是不现实的，因为相关的元器件会非常昂贵。这个精度等级今天只保留给了宏基站（宏 eNB），这种基站集成有高端振荡器，但这种振荡器决不是用于消费终端的，也无法承受

大的温度变化，且容易受汽车振动和加速的影响。

### 3.3 摩托车/电动自行车：对这些最易受伤害的道路用户来说没有蜂窝调制解调器障碍

没有标准 LTE 调制解调器的 LTE-V2X 成本甚至更高，比 IEEE802.11p 明显高很多。蜂窝调制解调器在摩托车和电动自行车中不常见，因为 eCall 法规不适用于摩托车。因此 LTE-V2X 成本对相对低成本的摩托车的影响是个障碍。

由于摩托车的高机动性，所以摩托车的定位是一个很大的挑战。GNSS 和 V2X 天线必须谨慎放置，不应该受智能手机的未知位置、方向和屏蔽套的影响。因此使用智能手机支持 V2X 应用不是一种合适的方法。对极度需要 V2X 保护的摩托车驾驶人来说 IEEE802.11p 是一种最经济的主动安全方案。

## 4 成熟性和未来展望

### 4.1 取样汽车周期

汽车市场的发展步伐与蜂窝市场有很大的不同。一部移动手机通常三年就要更换了，而一辆汽车可能要用 15 到 30 年，并且要求在这个时间跨度内可靠的工作。因此技术必须成熟，且经过全面的验证。发生故障时的召回具有严重的后果，因为召回一辆汽车与召回一部智能手机所造成的影响是不同的。

基于这个理由，在可靠性、寿命和工作条件等方面对汽车元器件提出了广泛的质量措施，以确保低的淘汰率（一般小于 1ppm）。这些措施不仅涵盖设计周期，还涵盖了测试和认证。

由于 V2X 在（半）自动驾驶中是必不可少的，我们希望它至少经认证能用在 ASIL-B 或更高安全等级的系统中，能与 AEC-Q100（基于故障机制的应力测试认证）、IEC62132（EMC 免疫）和 ISO26262（功能性安全认证）平起平坐。网络安全是安全性技术的另外一个重要方面。整个系统应该是安全的，并且有两个子模块（HSM 和网关）应该得到认证。在时间和设备方面的相关投资会超出蜂窝消费产品投资的正常范围。设计方法是不同的：蜂窝移动通信行业愿意作出这类投资吗？

## 4.2 未来发展和后向兼容问题

### 4.2.1 LTE-V2X

在总结 Rel-14 LTE-V2X（“阶段 1”）<sup>8</sup> 的同时，3GPP 已经在研究 LTE-V2X Rel-15（“阶段 2”）的未来增强特性，该版本有望作为 2018 年 12 月规范的一部分发布。

Rel-15 增强版覆盖的主要目标有<sup>9</sup>：

- 载波汇聚（多达 8 个 PC5 载波）
- 64-QAM 技术
- 研究缩短传输时间间隔（<1 ms）的好处和可行性
- 研究传送分集的好处和可行性

这些目标并不是用来解决本文提出的根本性挑战。

在 Rel-15 中引入新的增强功能的主要问题之一是处理 V2X 消息的后向和前向兼容性。如果 3GPP 规范不能满足这个要求，就没有推出 Rel-14 V2X 的积极性了，因为大家知道 Rel-14 是一种到达尽头的技术。然而，这种要求离满足还有很大距离，因为 Rel-15 技术性规范还没有准备好。

---

8 一致性测试规范和核心规范的维护修正

9 基于 Rel-15 LTE 的 V2X 的规范有望于 2018 年 12 月确定下来[RP-171069]



### 4.2.2 IEEE802. 11p

IEEE 组织正在持续发展和改进 802. 11 “WiFi” 无线局域网系列标准。所有的 WiFi 系列规范（“a”，“ac”，“n”，“p” 等）都收集在一个文档中。这样的文档就是正式的 IEEE 802. 11 标准，最新版发布于 2016 年 10。

802. 11 协议	初版日期	最大吞吐量	范畴
802. 11a	1999 年 9 月	54 Mbps	基于 OFDM 的第一个版本
802. 11g	2003 年 6 月	54 Mbps	改进了性能和覆盖距离
802. 11n	2009 年 10 月	150 Mbps	引入 MIMO
802. 11ac	2013 年 12 月	866 Mbps	提高了带宽和性能
802. 11p	2010 年 7 月	54 Mbps	V2X 应用

表 8: IEEE802. 11 协议演进。

我们可以发现，在 V2X 瞄准的应用方面，IEEE 比 3GPP 大约领先 8 年的时间。第一个版本（“802. 11p”）从 2010 年就开始进行了广泛的测试，对 V2X 来说如今已经是一种非常安全、成熟且可靠的技术。

在丰富经验的基础上，人们还在继续改进 802. 11p 标准。新版本目前命名为“802. 11px” [18]。改进的地方包括使用最新的 802. 11 “n” 和 “ac” 技术，比如用于信道编码的低密度奇偶检验（LDPC）、MIMO/天线分集以及改进的 OFDM 导频版图等。

为了充分利用过去十年来所有的发展和现场试验成果，802. 11p 用户很可能后向兼容 802. 11px，因为它一直兼容其它 802. 11 系列标准。如此看来，802. 11px 自然而然会是 802. 11p 标准的子集。这将确保两种技术之间的平滑过渡，同时在 802. 11px 推出之后仍能保持 802. 11p 标准的强大吸引力。

### 4.3 蜂窝技术的推广进程回顾

从过去历代蜂窝技术的推广进程来看，在与新的蜂窝技术推出相关的时间表方面，从第一个技术性报告规范发布到真正批量部署通常要花 5 到 6 年的时间 [4]。举例来说，LTE 从第一版规范发布（2007 年 10 月发布版本 8. 0）到达到 1 亿以上用户（2012 年底）就用了 5 到 6 年的时间。

我们记得至今为止（2017 年 6 月），Rel-14 V2X 规范还没有完全固定下来，仍然在进行技术性修正，因此很让人疑惑基于 LTE 的 V2X 究竟何时才能被认为技术上面成熟、可以被广泛采纳并可以大批量部署，这可能未来还需多年才能最终确定。

LTE-V2X 仍旧在持续变化。本文仅根据当前已经发布的内容，涉及到的某些问题可能在未来找到解决的方法，但这些基于未来方案的假设也意味着 LTE-V2X 技术的落地需要被继续推迟。

对于基于 LTE 技术的 LTE-V2X 而言，未来还将受到新发布的 5G 新无线技术 (NR) 的严重威胁。今天，3GPP 正在推进第一版 5G NR 尽快发布。5G 将为 V2X 提出另外一种解决方案 (V2X 阶段 3，或 eV2X)，但这种解决方案只能在第二版 5G NR 下实现。因此汽车行业可能没有意愿去采用一种我们已经知道很快要被 5G 淘汰的技术 (LTE Rel-14)。

#### 4.4 混合方案

混合方法可以整合每种技术的优点而产生一个更为完整更有希望的解决方案。例如 IEEE802.11p 在安全消息方面比 LTE-V2X 更强。另一方面，蜂窝网络可以在车辆之间以及车辆与云端之间提供更长距离的连接。

目前还缺少定义 IEEE802.11p 和蜂窝之间互连工作的标准化活动。在 3GPP 中增加这项工作有助于引入双方的最强项，提高蜂窝连接向汽车中的渗透率。

5GAA 建议将独立的 10MHz 信道分配给这两种技术[4]。然而，LTE-V2X 发射机会使 IEEE802.11p 接收机致盲，反之亦然。

另外，5GAA 建议（在申请使用 5.9GHz 的 ITS 专用频段的申请书中提到）将产生危险的先例，因为其它新技术可能利用这种理由申请频段资源而不考虑对现有安全关键网络所带来的标准碎片化负面影响。

两种技术应该以积极主动的方式共存，比如通过定义一种通用的方式访问可用资源。由于 IEEE802.11p 已经在市场中得到部署，因此 LTE-V2X 可以简单地部署与 IEEE802.11p 相同的 MAC，即基于 CSMA-CA 协议的 MAC。

### 5 本文小结

目前推荐的 LTE-V2X 是蜂窝技术满足安全关键要求的重要一步，但它还没有达到 IEEE802.11p 的性能等级，IEEE802.11p 在未来多年仍将是作为在道路上挽救生命的关键通信技术的唯一选择。

对适用于 V2X 应用的 IEEE802.11p 和 LTE-V2X 的详细技术性观察进一步确认了它们的互补特性。

在有网络的情况下，LTE-V2X 可以利用蜂窝领域中多年的创新成果为 V2I 和 I2V 服务提供有效的替代方案。IEEE802.11p 也覆盖 V2I 和 I2V，但效率较低些。

在没有网络的情况下，由于需要保持与 LTE 中相同的符号结构和相似的帧结构，LTE-V2X 会有很大的问题。IEEE802.11p 在鲁棒性和效率方面表现更好。

安全关键和挽救生命的应用仍然是汽车到汽车通信的核心部分，因此它必须能够在缺少网络的情况下有效的工作。

## 参考文献

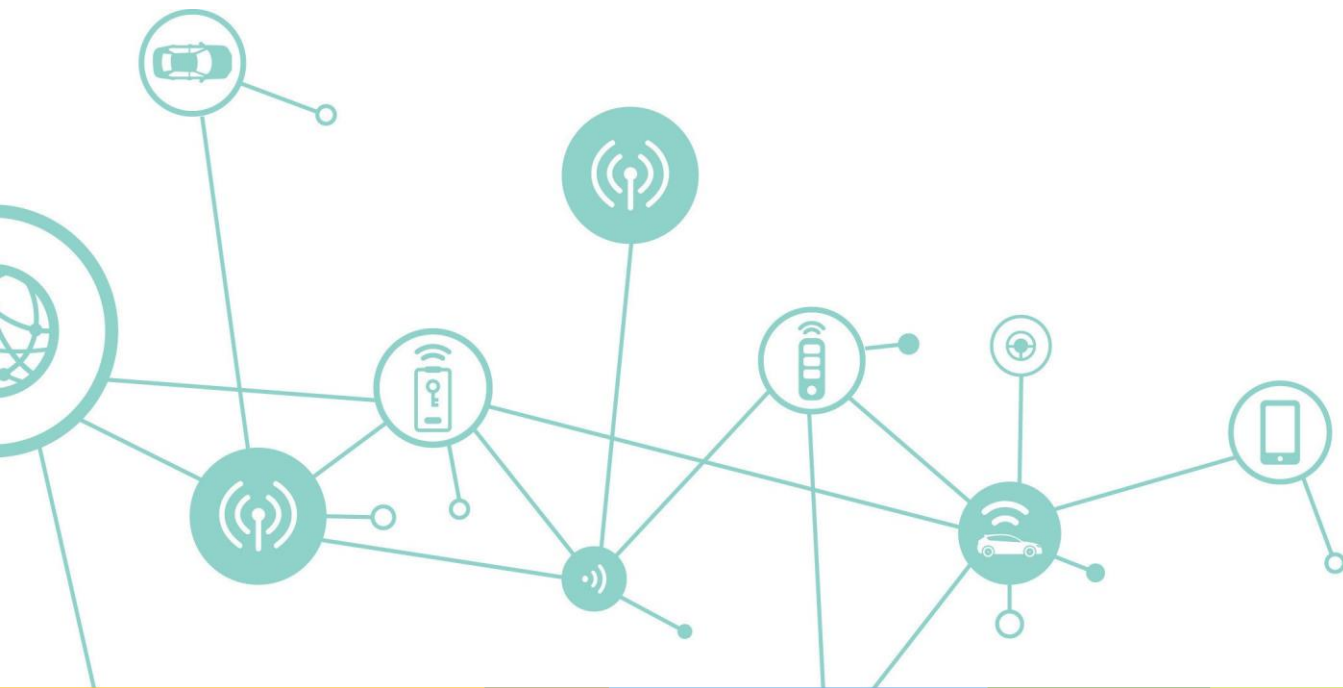
- [1] National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Department of Transportation (DOT), Federal Motor Vehicle Safety Standards; V2V Communications, Notice of Proposed Rulemaking (NPRM), Docket No. NHTSA-2016-0126, IN 2127-AL55 <https://www.nhtsa.gov/press-releases/us-dot-advances-deployment-connected-vehicle-technology-prevent-hundreds-thousands>
- [2] 5G Automotive Association, The Case for Cellular V2X for Safety and Cooperative Driving, <http://5gaa.org/pdfs/5GAA-whitepaper-23-Nov-2016.pdf>
- [3] Coexistence of C-V2X and 802.11p at 5.9 GHz, POSITION PAPER | 12 June 2017 [http://5gaa.org/pdfs/5GAA\\_News\\_neu.pdf](http://5gaa.org/pdfs/5GAA_News_neu.pdf)
- [4] A. Filippi et al. Why 802.11p beats LTE and 5G for V2x, April 2016, in <http://www.eenewsautomotive.com/design-center/why-80211p-beats-lte-and-5g-v2x>
- [5] NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration), Vehicle-to-Vehicle Communications: Readiness of V2V Technology for Application; DOT HS 812 014 page xviii
- [6] Qualcomm, The path to 5G: Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X), <https://www.qualcomm.com/documents/path-5g-cellular-vehicle-everything-c-v2x>
- [7] Math, C. Belagal, Li, H., Heemstra de Groot, S.M. and Niemegeers, I.G.M.M., V2X application-reliability analysis of data-rate and message-rate congestion control algorithms, 2017 IEEE Communications Letters, 21(6), 1285-1288.
- [8] simTD project Deliverable 5.5 - Part B-3: Technical Assessment, <http://www.simtd.de/index.dhtml/enEN/index.html>,
- [9] Connected Vehicle Safety Pilot, [http://www.its.dot.gov/safety\\_pilot/](http://www.its.dot.gov/safety_pilot/)
- [10] DRIVE C2X - Accelerate cooperative mobility, <http://www.drive-c2x.eu/project>
- [11] SCORE@F (Système Coopératif Routier Expérimental @ France), <https://project.inria.fr/scoref/en/>
- [12] Cooperative ITS Corridor, <https://itscorridor.mett.nl/English/Project+details/default.aspx>
- [13] Connected Vehicle Pilot Deployment Program, [www.its.dot.gov/pilots/](http://www.its.dot.gov/pilots/)
- [14] Status of the Dedicated Short-Range Communications Technology and Applications, Report to Congress [www.its.dot.gov/index.htm](http://www.its.dot.gov/index.htm) , Final Report—July 2015 FHWA-JPO-15-218
- [15] 3GPP, Initial Cellular V2X standard completed, [http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1798-v2x\\_r14](http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1798-v2x_r14)
- [16] Ye Li, L.J. Cimini, Bounds on the interchannel interference of OFDM time-varying impairments, in IEEE Transactions on Communications, vol 49, pp: 401-404, 2001
- [17] Vehicle Safety Communications – Applications (VSC-A) Final Report: Appendix Volume 1 System Design and Objective Test, <https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/811492b.pdf> , Table 7-2, page C-2-54

[18] NPRM commenting, by CAR 2 CAR Communication Consortium, Appendix 7.1 Evolution towards IEEE 802.11px.

[19] 3GPP RAN meeting document R1-163029, DM-RS Enhancements for V2V PSCCH and PSSCH, Qualcomm Incorporated

[20] 3GPP RAN meeting document R1-162538, Evaluation of DMRS enhancement for V2V with high Doppler, Nokia, Alcatel-Lucent Shanghai Bell

[21] 3GPP RAN meeting document R1-161183, WF on support of the increased subcarrier spacing for V2V communication, Intel, ITRI



[www.nxp.com](http://www.nxp.com) and [imxcommunity.org](http://imxcommunity.org)