



专题：移动通信（5G）测试

面向汽车的 MIMO OTA 测试技术

李雷¹, 魏贵明¹, 姜国凯², 冯家煦², 吴翔¹

(1. 中国信息通信研究院, 北京 100191; 2. 中国汽车技术研究中心有限公司, 天津 300300)

摘要: 汽车智能网联是当前交通产业发展的主要方向之一。通过汽车与周围车辆、行人、交通设施、蜂窝网络进行信息交互, 提升交通网决策管理智能化水平, 改善道路安全与效率。如何定量精确地评估整车通信性能是业界关注的热点问题, 然而目前尚缺少成熟的解决方案, 特别是面向整车产品。主要研究了基于多探头吸波暗室 (multi-probe anechoic chamber, MPAC) 的汽车空口测量系统的搭建方法, 并针对整车空口测试提出了一种低成本解决方案, 可以在信道模拟器数字通路受限的情况下, 通过数字变换, 成倍拓展测试区域。数字仿真结果表明, 基于此方案所构造的测试区域, 其空间相关性、时间相关性均满足相关标准要求。

关键词: 汽车空口测试; 多探头吸波暗室; 空间相关性; 时间相关性

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021040

MIMO OTA performance testing of vehicles

LI Lei¹, WEI Guiming¹, JIANG Guokai², FENG Jiayu², WU Xiang¹

1. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China

2. China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin 300300, China

Abstract: Intelligent traffic system is one of promising technologies for traffic industry. Based on communication among cars, pedestrian, traffic infrastructure and cellular networks, it's able to significantly promote on road safety and efficiency by making proper traffic instructions. How to precisely evaluate the communication performance of a whole vehicle become a hot-topic in the field. Unfortunately, there is still no solution about the setup and procedures for the OTA testing. A low-cost solution was proposed by reconstructing channel models and optimizing the existing testing system framework that referred to as multi-probe anechoic chamber. The proposed method was able to multiple the test area with limited channel emulator RF channels by introducing a low-cost digital converter. Numerical simulations indicate that the proposed method has the ability to reproduce spatial and temporal correlation features of the target channel model, which is coherent with related standards' requirements.

Key words: OTA testing for vehicles, multi-probe anechoic chamber, spatial correlation, temporal correlation

1 引言

多输入多输出 (multi-input multi-output,

MIMO) 通过在收发两端配置多路天线, 基于合适的空时编码技术, 可以在相同的时频资源上传输多流数据, 从而成倍地提升系统的频谱效率,

收稿日期: 2020-07-29; 修回日期: 2021-02-18

通信作者: 魏贵明, weiguiming@caict.ac.cn

是长期演进 (long term evolution, LTE) 和新空口 (new radio, NR) 接入网络的核心物理层技术之一。MIMO 系统实际性能表现主要与 3 方面有关: 无线传输环境、收发信机基带算法和多天线设计。移动通信的复杂空口给硬件和算法设计带来了严峻挑战。为了准确评估 MIMO 系统的实际性能表现, 便于产品快速优化, 无线通信工程师希望在实验室中复现外场的无线传输环境, 然后定量地考查基带和天线的整体性能。这首先涉及无线环境的数学建模, 根据参考文献[1], 无线信号从发送端到接收端经历的衰落可分为两类: 大尺度衰落和小尺度衰落。大尺度衰落包括路径损耗和阴影衰落, 主要影响接收信号的功率大小; 小尺度衰落包含多径和多普勒, 导致时间和频率选择性衰落, 影响基带解调性能。多径是无线信号在空间、时间、极化等维度上的延展, 可以用多径时延谱、空间角度功率谱、多普勒频偏功率谱、极化泄露比等进行数学描述。一种典型的建模方法是基于随机几何的空时信道模型, 如 WINNER 模型。实际信号传输中, 可能在散射体之间发生多次反射, 为了增强数学模型可塑性, 空时信道模型忽略中间反射过程, 只对首尾散射体进行建模。一种在实验室中复现这种信道模型的方法如图 1 所示, 将多个天线探头放置在被测设备周围, 模拟真实环境下来自不同方位的多径信号, 并且通过空口 (over-the-air, OTA) 建模方法, 保证实验室与外场的无线环境的一致性。这种测试方法被称为基于多探头吸波暗室 (multi-probe anechoic chamber, MPAC) 的 MIMO OTA 测试方法。

目前业界主要有 3 种 MIMO OTA 测试方案^[1], 分别是 MPAC、混响室以及基于传导或空口的二阶段法, 其中, MPAC 方案理论上可以精确模拟任意的空时信道模型, 目前在业界认可度最高, 因此, 本文仅讨论 MPAC 方案。CTIA (Cellular Telecommunications and Internet Association, 美国无线通信和互联网协会) 和 3GPP (the 3rd

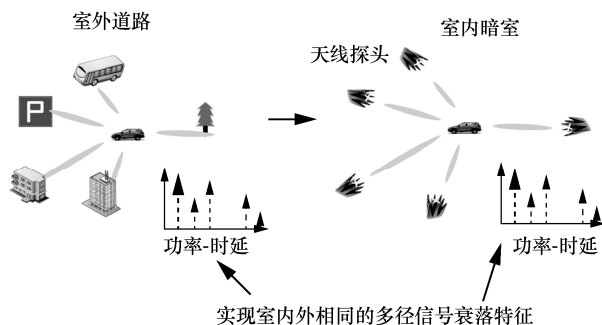


图 1 在实验室中复现这种信道模式的方法

Generation Partnership Project, 第三代合作伙伴计划) 的相关标准^[2-3]给出了 MPAC 方案系统搭建方法和模型验证方法。参考文献[1]规定了一种 LTE 下行双流 MIMO OTA 性能测试系统的标准验证方法, 参考文献[3]引用了 CTIA 标准并规定了其他多种 MIMO OTA 的测试方法。

通信行业中典型的 MPAC MIMO OTA 系统框架如图 2 所示。在测试区域周围布置若干个离散的天线探头, 每个天线探头发出的信号模拟了来自远场的一条信号分量, 通过合理控制每个天线探头的功率与相位, 这些离散信号可以近似模拟一种特定的空间角度功率谱, 从而模拟了真实环境下来自四面八方的到达信号空间分布特征。暗室外面的信号模拟器基于数字仿真, 复现了信号传输过程中的多径时延、多普勒、交叉极化比等衰落特征; 功率放大器用于放大下行信号, 弥补空口传输带来的路径损耗; 基站模拟器用于建立通信链路, 执行下行灌包和统计吞吐量等。被测终端吞吐量速率主要与收发信机之间信道的空间相关性有关, 根据参考文献[4], 空间相关性与角度功率谱是傅里叶变换的关系, 因此在图 2 所示的测试区域内, 准确复现目标信道的角度功率谱是 MIMO OTA 信道验证工作的核心内容之一。另外, 在实际测试过程中, 被测终端的尺寸必须小于所构造测试区域。

2 汽车 MIMO OTA 测试的挑战与解决方案

2.1 面向整车测试方案的挑战

随着汽车智能网联新需求的提出, 交通产业

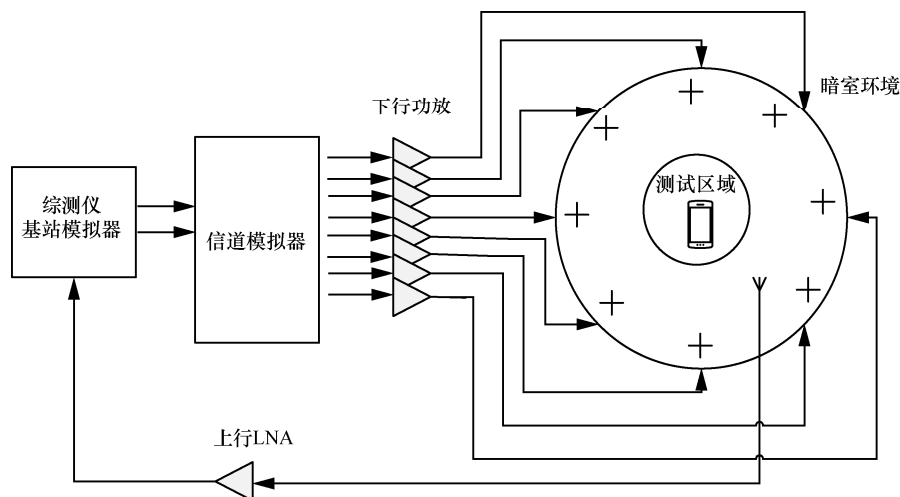


图2 一种典型的 MPAC MIMO OTA 系统框架

界越来越关注汽车与外界的通信能力^[5]。如何针对汽车通信产品开展实验室性能测试是当前业界讨论的热点内容，然而目前还没有成熟的解决方案。面向整车 MIMO OTA 是潜在的发展方向，然而首要的技术难题是汽车大小与手机大小相比明显增加，通信天线内置在汽车金属（或其他材料）外壳之中，因此可能需要考虑整个汽车作为被测设备，这意味着测试区域要大大增加。根据参考文献[6]，所构造的测试区域的大小与部署的离散天线探头数目 K 可以近似用如下计算式表达：

$$K = 2 \left\lceil \frac{\pi D}{\lambda} \right\rceil + 1 \quad (1)$$

其中， D 是被测设备的尺寸， λ 是中心频率的波长， $\lceil \cdot \rceil$ 代表向上取整函数。以 LTE B41 频段 2.6 GHz 为中心频点为例，其波长为 11.54 cm，对于一个大小也为 11.54 cm 的被测设备而言，根据式（1）计算可得： $K=9$ 。根据参考文献[7]，8 个离散探头可以支持的测试区域大小约为 0.7 倍波长，16 个探头可以将测试区域拓展至 1.5 倍波长。根据参考文献[8]，工业和信息化部为我国车联网直通信划分的频率范围为 5 905~5 925 MHz，以 5 915 MHz 为中心频点，1.5 倍波长对应的区域大小为 7.61 cm，远小于一个汽车的大小。典型 LTE 和 5G 智能手

机大小的调研结果统计在表 1 中。典型汽车三维大小调研结果统计在表 2 中。

表1 典型商用 5G/LTE 智能手机三维尺寸

三维	华为 Mate30	iPhone 11	三星 S20	VIVO NEX 3	小米 10
长/mm	160.8	150.9	151.7	167.4	162.6
宽/mm	76.1	75.7	69.1	76.1	74.8
厚/mm	8.4	8.3	7.9	9.4	8.96

表2 典型轿车、越野车汽车三维尺寸

三维	奥迪 A4L	奥迪 Q5	丰田 凯美瑞	丰田 汉兰达	长安 锐程	长安 CS95
长/mm	4 858	4 765	4 885	4 890	4 800	4 949
宽/mm	1 847	1 893	1 840	1 925	1 825	1 930
高/mm	1 439	1 659	1 455	1 720	1 465	1 790

如果考虑整车作为一个被测设备，测试区域的直径至少需要 5 m（小型轿车），在 5.9 GHz 车联网频段上，根据式（1）计算得到的离散探头数为 621 个，基于现有 MIMO OTA 技术，每个天线均需要与一个信道模拟器（channel emulator, CE）输出端口连接，因此需要 621 个 CE 端口，大约对应于 10 台是德科技 F64 或者 78 台思博伦 VERTEX，并且无论是系统搭建、环境校准，其复杂度都是无法承担的。此外，一台信道模拟器

的成本一般在数百万到千万级别,如果按照上述思路开发面向整车的 MIMO OTA 系统,系统建设成本将十分高昂。因此本文考虑引入低成本的数字变换器,基于算法设计与优化,在成本可控的条件下,实现测试区域的拓展。

2.2 整车 MIMO OTA 测试新架构

本文提出了一种新型的 MIMO OTA 系统建设架构(如图3所示),与典型系统架构(如图2所示)不同,在暗室天线探头和 CE 中间引入数字变换网络,将 CE 的每路输出通过修改功率和添加时变随机相位,可以数倍或者十几倍地拓展数字通道,从而降低对 CE 通道资源的要求。在第3节的仿真验证中可以看到,本文提出的架构可以在已有8探头暗室条件下,将拓展区域由0.7倍波长拓展至10倍波长。

2.3 数字变换网络的实现原理

假设数字变换器将每一路 CE 的输出拓展为 β 路。在不考虑极化的情况下,CE 第 i 路输出的信道系数 $h_{ce,i}(\tau, t)$ 可以描述为(参考文献[4]):

$$h_{ce,i}(\tau, t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sqrt{w_{ce,n,i}} c_n \sum_{m=1}^{M_n} \chi_{n,m,i} a_{n,m} e^{j2\pi f_{n,m}t + \theta_{n,m}} \delta(\tau - \tau_n) \quad (2)$$

其中, τ 代表时延, t 代表时间, $\{N, M_n, c_n\}$ 分别代表了无线信道中散射体的数目、第 n 个散射体中子径的数目和第 n 个散射体的总路径增益; $\{a_{n,m}, f_{n,m}, \theta_{n,m}\}$ 代表来自第 n 个散射体第 m 个子径的路径增益、多普勒、随机初始相位, $\delta(\cdot)$ 为单位冲激函数。 $\chi_{n,m,i} \in \{0,1\}$ 为第 i 路第 n 个簇中

第 m 个子径的分配因子,当 $\chi_{n,m,i}=1$ 时,代表该子径包含在第 i 路信号中;否则不包含。 $w_{ce,n,i}$ 为第 i 路中第 n 个簇输出的功率系数,计算为:

$$w_{ce,n,i} = \sum_{k \in K_i, |K_i|=\beta} p_{k,n} \quad (3)$$

其中, K_i 为与 CE 第 i 路输出映射的天线探头集合, $p_{k,n}$ 为通过典型方案中通过预衰落合成算法或者平面波合成算法(参考文献[4])求得的对应于第 k 个探头第 n 个簇的最优功率权重系数,并且 $\sum_{i=1}^{K_{ce}} w_{ce,n,i} = 1$ 。CE 的输出与数字变换器逐一相连。第 i 路信道时间序列 $h_{ce,i}(\tau, t)$ 经过数字处理后,拓展成 β 路序列 $h_{AT,i,1}(\tau, t), h_{AT,i,2}(\tau, t), \dots, h_{AT,i,\beta}(\tau, t)$, 该过程表示如下:

$$\begin{bmatrix} h_{AT,i,1}(\tau, t) \\ h_{AT,i,2}(\tau, t) \\ \dots \\ h_{AT,i,\beta}(\tau, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\tilde{p}_{i1}} \cdot \Phi_{i1}(t) \\ \sqrt{\tilde{p}_{i2}} \cdot \Phi_{i2}(t) \\ \dots \\ \sqrt{\tilde{p}_{i\beta}} \cdot \Phi_{i\beta}(t) \end{bmatrix} \cdot h_{ce,i}(\tau, t) \quad (4)$$

$$\tilde{p}_{i,j} = \frac{\sum_{n=1}^N p_{k_{i,j},n} \cdot c_n^2}{\sum_{k \in K_i} \sum_{n=1}^N p_{k,n} \cdot c_n^2}, j=1,2,\dots, |K_i| \quad (5)$$

其中, $\tilde{p}_{i,j}$ 和 $\Phi_{ij}(t)$ 分别代表了第 j 路拓展信号对第 i 路输入信号在功率和相位上的修正,下标 $k_{i,j}$ 为第 i 路输入第 j 路拓展对应的天线探头的序号 $k_{i,j} \in K_i$ 。基于上述对天线探头功率的控制,使所构造测试系统的来波信号角度功率谱与目标信道保持一致。此外,通过优化子径分配集合

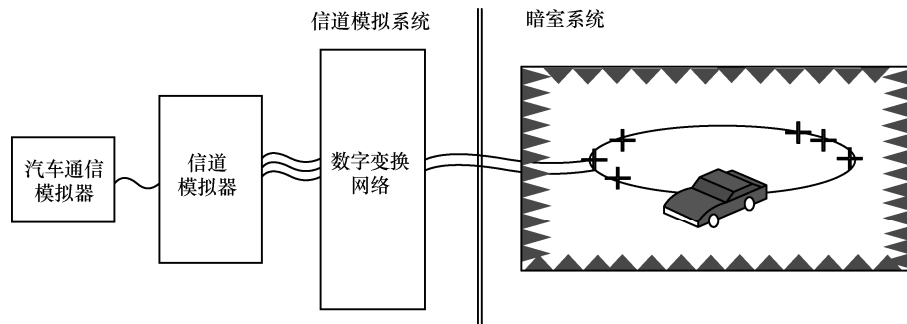


图3 面向整车的新型 MIMO OTA 系统建设架构



$\Gamma = [\chi_{n,m,t}]_{N,M,K_{CE}}$ 以及数字变换器的相控函数 $\Phi(t) = [\cdots, \Phi_{i1}(t), \Phi_{i2}(t), \cdots, \Phi_{i\beta}(t), \cdots]$, 复现目标空时信道的多普勒特性:

$$[\Gamma, \Phi(t)] = \arg \min_{\Gamma, \Phi(t)} \left\{ \int |P(f_d) - \hat{P}(f_d)| df_d \right\} \quad (6)$$

其中, 所构造的多普勒功率谱表示为 $\hat{P}(f_d)$, 目标空时信道的多普勒功率谱表示为 $P(f_d)$ 。可以采用基因算法、遗传算法等迭代优化求解上述目标函数, 使得测试区域中的多普勒功率谱 $\hat{P}(f_d)$ 与目标空时信道模型的相应特性保持一致, 具体过程不赘述。

3 数字仿真验证

3.1 数字仿真参数说明

本文采用参考文献[3]的表 2.4.3-1 中定义的空间信道模型拓展 (spatial channel model extension, SCME) 城市宏小区场景的信道参数, 进行空间相关性 (计算方法见参考文献[7]) 和时间相关性 (计算方法见参考文献[3]) 的数字仿真。主要对比了不同方案在同样 CE 通道资源的条件下, 可以支持的最大测试区域。空见相关性验证中, 测试区域采点方式如图 4 所示。时间相关性验证的时间范围与参考文献[3]的图 A.2.2.1-1 相同。本文仿真暂不考虑极化建模, 即假设发射和接收机均为垂直极化。

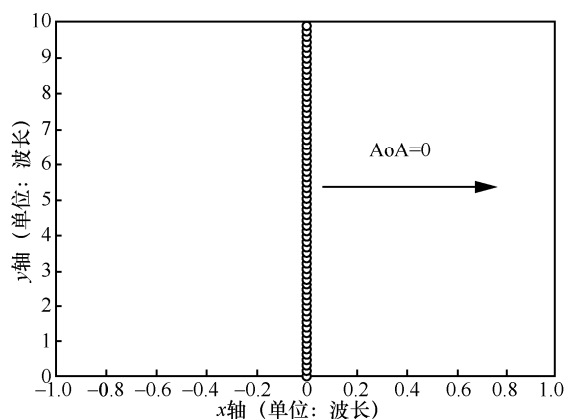


图4 空间相关性验证区域采点方式

对比方案整理如下:

- (1) 典型方法, CE 8 探头方案 (参考);
- (2) 典型方法, CE 32 探头方案 (参考);
- (3) 数字变换, CE 8 探头优化方案 (本文方案);
- (4) 数字变换, CE 2 探头优化方案 (本文方案)。

主要对比不同方案的空间相关性和时间相关性与理论模型的近似程度。

3.2 空间相关性验证

首先对比本文提出的基于数字变换的 CE 2 探头优化方案与典型 CE 8 探头方案, 在 1 倍波长范围内测试区域中的空间相关性情况。在图 5 中, 首先给出了 CTIA 的 4 条标准空间相关性曲线, 分别是理想曲线、8 探头方案曲线、下界、上界。符合 CTIA 标准认证的 MIMO OTA 实验室, 要求在 1 倍波长测试区域内的空间相关性曲线不得超出上界和下界。基于数字变换 CE 2 探头曲线和典型方案 CE 8 探头曲线, 是基于数字仿真, 并利用信道冲击响应函数, 根据式 (3) 计算得出。理论值曲线则是根据探头的功率分布, 按照瑞利衰落条件下的空见相关性计算式推演得出 (详见参考文献[7])。从图 5 中可以看到, 无论是本文提出的数字变换 CE 2 探头方案, 还是典型的 CE 8 探头方案, 均可以在 1 倍波长测试区域范围内逼近 CTIA 理想探头布局曲线。

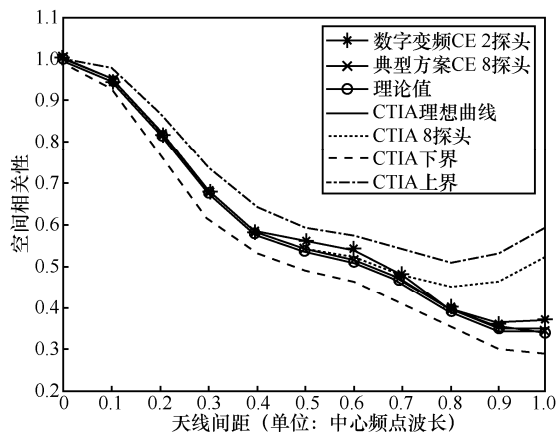


图5 数字变换 CE 2 探头与典型 CE 8 探头空间相关性性能对比

继续对比本文提出的基于数字变换的 CE 8 探头优化方案与典型 CE 32 探头方案, 在图 4 所示的 10 倍波长范围内的测试区域中的空间相关性变化。在图 6 中可以看到, 基于数字变换 CE 8 探头曲线和典型方案 CE 32 探头曲线, 均可以在 10 倍波长测试区域范围内逼近 CTIA 理想探头布局曲线。两条曲线与理论值的偏差不超过 0.1。

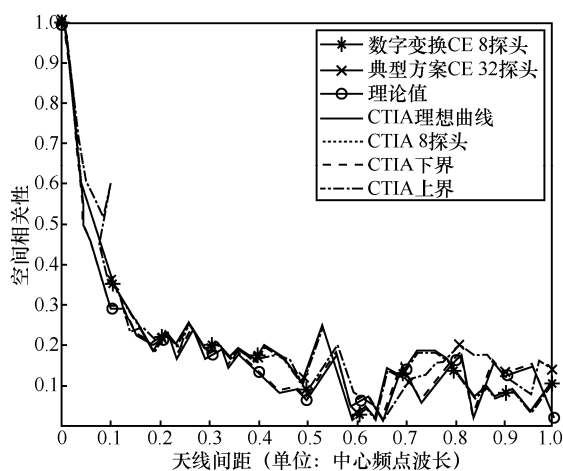


图6 数字变换 CE 8 探头与典型 CE 32 探头空间相关性性能对比

3.3 时间相关性验证

按照 3GPP 或者 CTIA 规定的时间相关性验证方法, 仿真验证本文提出的基于数字变换的 CE 2 探头优化方案与典型 CE 8 探头方案, 以及基于数字变换的 CE 8 探头优化方案与典型 CE 32 探头方案在测试区域中心的时间相关性变化曲线。图 7 和图 8 中, 分别给出了 CTIA 标准规定的时间相关性理论曲线、上界曲线、下界曲线, 其中, x 轴代表以中心与反点波长为单位的时间刻度, 按照参考文献[3]第 A2.2.1 节的要求, 对时间乘以速度除以波长。基于数字变换 CE 2 探头、8 探头时间相关性曲线, 以及基于典型方案的 8 探头、32 探头时间相关性曲线是按照式 (4), 利用时域信道冲击影响函数计算得出的。图 7 和图 8 中的理论曲线根据参考文献[3]和参考文献[10]中定义的 SCME 子径空间分布、子径功率、用户运动速度等计算多普勒功率谱, 然后进行傅里叶变换得出。

基于图 7 和图 8 可以看出, 本文提出的数字变换 CE 2 通道, 数字变换 8 通道 MIMO OTA 系统重构方法, 与典型方案 CE 8 通道和典型方案 CE 32 通道的相应时间相关性曲线在 5 倍波长时间范围内基本保持一致, 同时与理论曲线变化趋势一致, 偏差较小, 并且处于 CTIA 规定上界和下界的范围内。

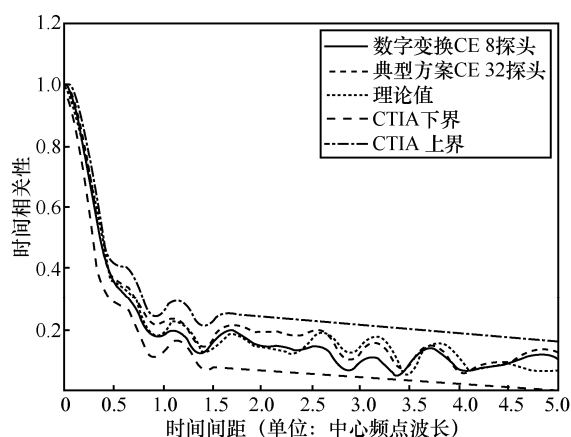


图7 数字变换 CE 8 探头与典型 CE 32 探头时间相关性性能对比

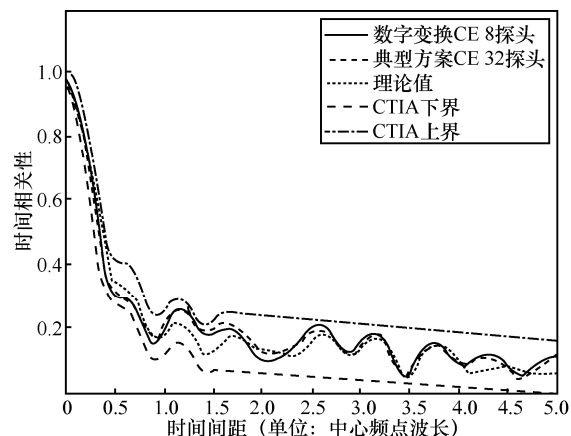


图8 数字变换 CE 8 探头与典型 CE 32 探头时间相关性性能对比

4 结束语

MIMO OTA 测试技术首先发展于通信产业, 支持小型智能终端空口性能的定量考查。随着汽车智能网联技术的发展, 汽车开始更多地与网络及周围交通参与者进行通信, 准确验证汽车空口实际性能表现将会成为汽车产业关注的热点内



容，特别是涉及道路安全的通信场景。本文展示了一种面向汽车的新型 MIMO OTA 测试系统搭建方法，从时间相关性和空间相关性两个维度验证所提方案的可行性。根据数字仿真结果，使用少量的信道模拟器通道，基于适当的数字变换，可以实现测试区域的明显拓展，从而极大地降低汽车整车 MIMO OTA 系统搭建成本。后续将在两个方面继续开展相应的研究工作。一是信道模型，汽车与汽车、汽车与路边单元、汽车与行人通信的无线信道特征与蜂窝基站和手机之间有明显区别，下一步将开展车联网信道模型研究，探讨不同场景、不同信道模型下的整车性能评估方法。二是测试系统的校准方法和不确定度分析，由于引入了新的设备，如何准确、快速地进行链路功率和相位校准是面临的一个重要问题，特别是数字变换器对系统稳定性（例如功率相位随温度、时间的偏移等）和不确定度的影响。

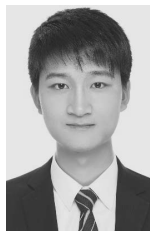
参考文献：

- [1] 3GPP. Spatial channel model for multiple input multiple output (MIMO) simulations: TR25.996, V15.0.0[S]. 2018.
- [2] 3GPP. Verification of radiated multi-antenna reception performance of User Equipment (UE): TR37.977, V15.0.0[S]. 2018.
- [3] CTIA. Test plan for 2x2 downlink MIMO and transmit diversity over-the-air performance: Version 1.2[S]. 2018.
- [4] PEKKA K, TOMMI J, NUUTINEN J P. Channel modelling for multiprobe over-the-air MIMO testing[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2012(10): 1-11.
- [5] 林琳, 李璐, 葛雨明. 车联网通信标准化与产业发展分析[J]. 电信科学, 2020, 36(4): 15-26.
LIN L, LI L, GE Y M. Analysis of the communication standardization and industry development of internet of vehicles[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(4): 15-26.
- [6] TOMMI L, PEKKA K, NUUTINEN J P, et al. On the number of OTA antenna elements for planewave synthesis in a MIMO-OTA test system involving a circular antenna array[C]//Proceedings of the Fourth European Conference on

Antennas and Propagation.[S.l.:s.n.], 2010.

- [7] FAN W, XAVIER C, SUN F, et al. Emulating spatial characteristics of MIMO channels for OTA testing[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(8): 4306-4314.
- [8] 工业和信息化部. 车联网(智能网联汽车)直连通信使用 5 905~5 925 MHz 频段的管理规定(征求意见稿)[R]. 2018-06-27.
MIIT. Regulation on the use of 5 905~5 925 MHz band for direct communication in the internet of vehicles (intelligent connected vehicle) (draft for comments)[R]. 2018-06-27.
- [9] WEI F, PEKKA K, NIELSEN J, et al. Wideband MIMO channel capacity analysis in multiprobe anechoic chamber setups[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(5): 2861-2871.
- [10] BAUM D S, HANSEN J, SALO J. An interim channel model for beyond-3G systems: extending the 3GPP spatial channel model (SCM)[C]//Proceedings of Vehicular Technology Conference.[S.l.:s.n.], 2005.

【作者简介】



李雷（1990—），男，中国信息通信研究院工程师，主要研究方向为无线通信原理与系统、无线信道建模与分析、MIMO OTA 性能测试技术、车联网性能测试方法等。



魏贵明（1970—），男，中国信息通信研究院移动通信创新中心常务副主任，主要研究方向为移动通信技术标准、产业组织和发展策略等。

姜国凯（1990—），男，中国汽车技术研究中心有限公司高级工程师，主要研究方向为智能网联汽车电磁兼容和通信质量测评。

冯家煦（1994—），男，中国汽车技术研究中心有限公司工程师，主要研究方向为智能网联汽车通信质量测试评价。

吴翔（1979—），男，中国信息通信研究院高级工程师，主要研究方向为无线通信、射频、电磁兼容等。