

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306865

# 5G TM 信号无线信道测量平台研究与实现\*

陈晨<sup>1</sup> 费丹<sup>2</sup> 郑鹏<sup>2</sup> 艾渤<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学智慧高铁系统前沿科学中心 北京 100044; 2. 北京交通大学电子信息工程学院 北京 100044)

**摘要:**为了研究第五代移动通信(5G)系统无线信道,获得准确的5G无线信道特性和信道模型,提出了一种基于5G新空口(NR)测试模式(TM)信号的无线信道测量平台。开展了TM无线信道测量平台的总体架构及测量信号接收处理算法设计,并基于软件无线电设备和高性能计算设备搭建测量平台。针对功率谱平坦度、峰均功率比和相关性等指标,对多种TM信号的测量性能进行评估。根据性能评估结果,选择适合作为测量波形的TM信号。采用射频馈线直连、多径信道模拟和静态空口实测3种方法对TM无线信道测量平台进行验证,该平台不仅可以实现准确的信道测量,同时能够对矢量幅度误差和误比特率等传输性能进行测试。

**关键词:**信道测量平台;测试模式信号;测量波形评估;测量验证;5G

**中图分类号:** TN921 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1015

## Research and implement of wireless channel measurement platform based on 5G TM signal

Chen Chen<sup>1</sup> Fei Dan<sup>2</sup> Zheng Peng<sup>2</sup> Ai Bo<sup>2</sup>

(1. Frontiers Science Center for Smart High-Speed Railway System, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** To study the wireless channel of the fifth generation mobile communication system (5G) and obtain accurate wireless channel characteristics and channel model of the 5G networks, a channel measurement platform based on the test model (TM) signal of 5G new radio is proposed. The TM wireless channel measurement platform including the whole architecture and algorithm of the receiving signal process is designed and constructed by using the software radio devices and the high-performance computing equipment. The measurement performance of the TM signals is evaluated in terms of the flatness of the power spectrum, the peak to average power ratio, and the correlation. According to the results, TM signals with better measurement performance are selected as the measurement waveforms. The proposed channel measurement platform is validated based on three different methods including direct connection verification, multipath emulation verification and air interface verification. The measurement platform not only achieves accurate channel measurement, but also obtains transmission performance such as error vector magnitude and bit error rate.

**Keywords:** channel measurement platform; test model signal; measurement waveform evaluation; measurement verification; 5G

## 0 引言

近些年,随着第五代移动通信网络(5G)的广泛部署,5G网络已经给人们的生活和工作带来了巨大的改变,同时也暴露出覆盖范围不广、信号稳定性不足等问

题,为了进一步提升用户体验,需要持续开展基于5G无线信道模型的网络部署和优化。另外,5G演进技术(B5G)及6G技术也逐渐成为学者们研究的热点,新技术和新场景带来了新的无线电波传播特性,将影响无线通信系统设计。无线信道是影响无线通信系统性能的关键因素,准确描述无线信道特性及精确实现信道建模是无

收稿日期:2023-09-04 Received Date:2023-09-04

\* 基金项目:中央高校基本科研基金(2022JBQY004)、浙江省重点研发项目基金(2023C01003)项目资助

线通信系统设计、部署及优化的基础。

无线信道测量是实现信道特性分析及信道建模的重要手段,一直是无线信道研究的重要方向。由于 5G 网络引入了大规模 MIMO (multiple input multiple output)、毫米波通信等新技术,以及车联网、高速铁路等新场景,5G 信道测量成为了研究的热点。学者们针对不同场景、不同频段、不同技术搭建信道测量平台,开展了大量 5G 信道测量工作<sup>[1]</sup>。文献[2]利用任意信号发生器及矢量信号源构建测量平台,开展 500 MHz 频段城市及郊区场景信道测量,选择高阶 PN (pseudo noise) 序列作为测量波形,提升测量动态范围,避免噪声和干扰的影响。文献[3]利用商用信道测量平台开展了 3.8 GHz 频段郊区和农村宏蜂窝小区场景信道测量,测量使用伪随机序列作为测量波形,接收端通过相关运算得到信道冲激响应。文献[4-7]针对不同频段和场景开展 5G 大规模 MIMO 信道测量,研究大规模 MIMO 技术下 5G 信道特性。文献[8]基于信号发生器和多通道采集系统构建信道测量平台,利用 PN 序列作为测量波形,研究超大规模 MIMO 信道特性。文献[9-11]利用软件无线电设备搭建信道测量平台,开展 5.9 GHz 频段城市和郊区车车通信场景信道测量。

5G 标准中定义了 sub-6GHz (FR1) 和毫米波 (FR2) 两种工作频率范围,上述文献重点针对 sub-6GHz 频段开展测量。相比 sub-6GHz 频段,毫米波频段具有较大路径传输和穿透损耗,此外,还极易受到降水、氧气等因素的影响。目前学者们将测量频段由 sub-6GHz 扩展至毫米波频段。文献[12]利用商用信号发生器和频谱分析仪基于时域扩频滑动相关方法开展信道测量,测量频率覆盖 sub-6GHz 和毫米波频段,研究了频率变化对信道特性的影响。文献[13]基于商用软件无线电设备搭建全数字 MIMO 信道测量平台,利用随机选择的训练符号作为测量波形,开展微小区场景下 28 GHz 频段信道测量。文献[14]搭建窄带信道测量平台,测量信号采用 28 GHz 连续波,研究室内走廊非视距场景的毫米波信道路径损耗。文献[15]开展了郊区宏蜂窝场景 5G 毫米波频段信道测量。文献[16]和[17]分别利用时域信道测量系统和矢量网络分析仪开展多频段、多场景 5G 毫米波频段 MIMO 和大规模 MIMO 信道测量。

上述文献搭建的测量平台,采用伪随机序列或训练序列作为测量波形。基于通信系统标准信号开展的信道测量可以获得该通信系统条件下更准确的信道特性,因此,学者们研究了利用标准信号或信道开展信道测量。文献[18]基于通用移动通信系统 (universal mobile terrestrial system, U-TMS) 公共导频信道 (common pilot channel, CPICH) 下行信号开展地铁场景信道测量。文献[19-20]基于 LTE (long term evolution) 网络中小区参考信号 (cell-specific reference signals, CRS) 面向高速铁路场景

开展信道测量。文献[21]利用 5G 商用网络信道状态信息参考信号 (channel state information reference signal, CSI-RS) 开展工业园和停车场等场景静态信道测量。

本文以 5G 新空口 (new radio, NR) 测试模式 (test model, TM) 信号作为测量信号搭建信道测量平台,并对搭建的信道测量平台进行验证。TM 信号是 3GPP 5G NR 标准中定义的用于下行链路射频性能一致性测试的信号。标准中定义了多种 TM 信号,主要差别包括频段、带宽、子载波间隔、调制方式等,可以根据测量目标选择不同的 TM 信号作为测量信号。基于 TM 信号的信道测量平台不仅可以实现信道冲激响应等信道测量参数提取,而且能够对矢量幅度误差 (error vector magnitude, EVM) 和误比特率 (bit error ratio, BER) 等传输性能指标进行测试。论文的主要创新点包括:

1) TM 无线信道测量平台搭建。TM 无线信道测量平台基于通用软件无线电外设 (universal software radio peripheral, USRP) 和高性能计算设备搭建,由测量发射端和测量接收端组成。测量发射端主要负责测量信号生成和发射。测量接收端处理和分析接收到的测量信号,得到信道冲激响应,并统计 EVM 和 BER 等传输性能结果。

2) TM 测量波形设计与性能评估。详细分析了 3GPP 标准中定义的各种 TM 信号,基于测量波形的基本要求,选择合适的 TM 信号作为备选测量波形。以多音波形作为对照,从功率谱密度、峰均功率比和相关性等方面,研究 TM 信号作为测量波形的性能。

3) TM 无线信道测量平台验证。针对提出的 TM 无线信道测量平台开展了射频馈线直连、多径信道模拟和静态空口实测 3 种验证工作。射频馈线直连验证实现测量方法验证的同时实现背靠背校准。多径信道模拟验证重点验证信道测量平台多径测量能力。静态空口实测是验证信道测量平台实测能力。

## 1 TM 无线信道测量平台

本章详细介绍了 TM 无线信道测量平台的总体架构,测量波形选择及性能评估以及测量信号接收处理算法等内容。

### 1.1 总体架构

TM 无线信道测量平台总体架构如图 1 所示。测量平台由发射端和接收端组成。发射端主要由测量发射端上位机、信号发射设备、功率放大器和发射天线组成。接收端由接收端上位机、信号接收设备、接收天线组成。发射端和接收端上位机均采用高性能计算设备分别部署波形生成软件和信道分析软件。信号发射机和接收机基于 USRP 设计负责信号上下变频和模数/数模变换。发射端上位机主要功能是根据测量需求生成标准 TM 基带 IQ

数据,信号发射机负责将基带信号数模转换并经上变频至射频信号,射频信号经过功率放大器放大以提升测量动态范围,再通过发射天线发射。信号接收机主要功能是将接收天线接收到的测量信号进行下变频及模数变化至基带信号。接收端上位机对基带信号进行处理、分析,生成信道冲激响应,并统计信道传输性能。

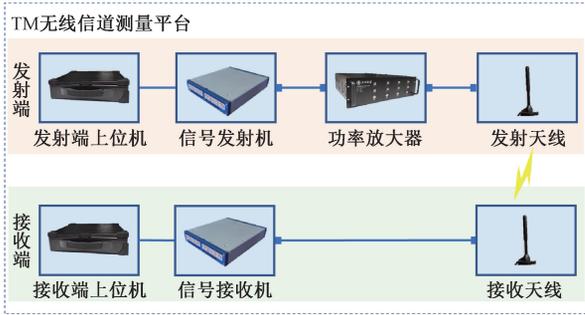


图 1 TM 无线信道测量平台总体架构

Fig. 1 The architecture of TM wireless channel measurement platform

### 1.2 测量波形

测量平台的性能主要取决于测量信号的选择。TM 信号是 3GPP 5G NR 标准中定义的用于下行链路射频性能一致性测试的信号<sup>[22]</sup>。3GPP 协议中定义了多种 TM 信号,其中,针对 FR1 频段的 TM 信号主要差别总结如表 1 所示。每种 TM 信号可以配置不同的带宽(BW)和子载波间隔(SCS)组合,子载波间隔包括 15、30、和 60 kHz,信道带宽包含 5~100 MHz<sup>[23]</sup>。调制方式包括正交相移键控(quadrature phase shift keying, QPSK)和正交幅度调制(quadrature amplitude modulation, QAM)。由于 TM 信号具有多种带宽和子载波配置组合,最大带宽可达 100 MHz(FR1 频段),并且支持多种调制方式,适合作为无线信道测量波形,因此,本文选择 TM 信号作为测量波形搭建无线信道测量平台。

表 1 TM 信号主要差别

Table 1 Major differences of TM signals

TM 信号	测试功能	调制方式
NR-FR1-TM1.1	基站输出功率,发射功率开关,定时误差,非期望发射,发射机互调,接收机杂散发射	QPSK
NR-FR1-TM1.2	非期望发射	QPSK
NR-FR1-TM2	功率动态范围	64QAM
NR-FR1-TM2a	功率动态范围	256QAM
NR-FR1-TM2b	功率动态范围	1 024QAM
NR-FR1-TM3.1	功率动态范围,发射信号质量	64QAM
NR-FR1-TM3.1a	功率动态范围,发射信号质量	256QAM
NR-FR1-TM3.1b	功率动态范围,发射信号质量	1 024QAM
NR-FR1-TM3.2	发射信号质量	QPSK、16QAM
NR-FR1-TM3.3	发射信号质量	QPSK

TM 信号时频资源占用情况直接影响验证性能。为了描述清晰,本节以带宽为 10 MHz 和子载波间隔为 15 kHz 的 NR-FR1-TM1.1 信号为例,资源块(resource block, RB)级资源网格如图 2 所示,横坐标表示 OFDM(orthogonal frequency division multiplex)符号,纵坐标为资源块。其他子载波间隔和带宽组合对应的 TM 信号资源网络与图 2 相似。TM 信号由物理下行共享信道(physical downlink shared channel, PDSCH)和物理下行控制信道(physical downlink control channel, PDCCH)组成。基于 PDCCH 和 PDSCH 信息,可以进行信道测量及传输性能测试。

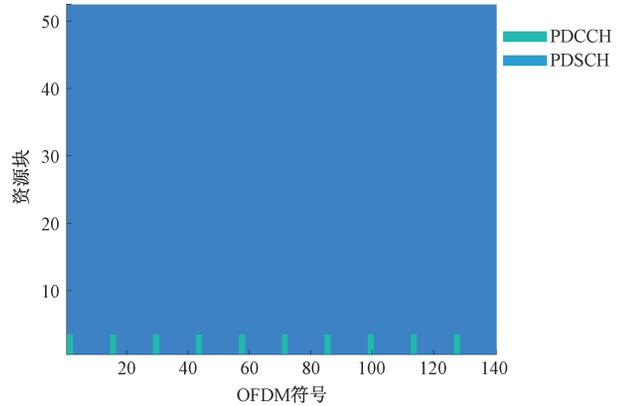


图 2 资源块级资源网格

Fig. 2 Resource grid

### 1.3 波形性能评估

为了提升测量效率,测量平台使用的测量波形需要满足较大的带宽,较大的时间带宽积,高效的信号持续时间,平坦的功率谱密度,较低的峰均功率比和较大相关性等要求<sup>[24]</sup>。本节选择多音波形作为对照,给出多音波形, TM1.1, TM3.1 和 TM3.1a 这 4 种波形的功率谱密度、峰均功率比和相关性等结果。以 10 MHz 带宽和 15 kHz 子载波间隔 TM 信号为例,4 种对比波形的的基本参数如表 2 所示。其他子载波间隔和带宽组合对应的 TM 信号对比结果一致。

表 2 4 种对比波形的的基本参数

Table 2 Parameters of four waveforms

参数	值
带宽	10 MHz
子载波间隔	15 kHz
采样率	15.36 MHz
采样点数	2 048

信道测量波形的功率谱密度(power spectrum density, PSD)应该是平坦的,这样每个频点的测量质量是一致的。4 种测量波形的功率谱密度如图 3 所示,多音功率谱密度和 TM1.1 波形的功率谱密度在有效带宽内是平坦的,而 TM3.1 和 TM3.1a 波形功率谱密度出现

较小幅度的波动,这是由于 TM3.1 和 TM3.1a 波形分别采用 64QAM 和 256QAM 高阶调制方式造成的。另外,从图 3 中还可以看出, TM 波形的带宽均略低于设置的 10 MHz 带宽,这是由于存在保护间隔的原因。

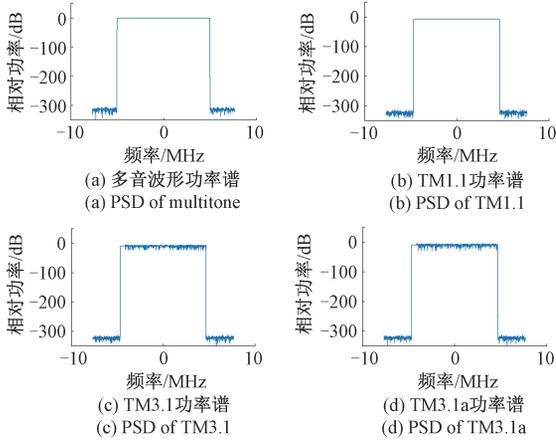


图 3 4 种测量波形功率谱

Fig. 3 PSD of four measurement waveforms

峰均功率比 (peak to average power ratio, PAPR) 表示测量波形峰值幅度与均方根幅度之比。如果测量波形的峰均功率较大,就要求测量系统硬件具有较大的动态范围,对硬件要求高。4 种波形的峰均功率比如表 3 所示, TM 波形的峰均功率比要比多音波形高,这是因为多音波形每个子载波的波形相位可以任意设置,从而保证测量波形具有较低的峰均功率比。而 TM 信号每个子载波波形需要按照调制方式配置幅度和相位。从表 3 中还可以看出,随着调制阶数越高,峰均功率比越大。

表 3 4 种测量波形峰均功率比

Table 3 PAPR of four waveforms

测量波形	峰均功率比
多音波形	1.460 2
TM1.1	2.559 1
TM3.1	2.571 5
TM3.1a	3.030 5

基于相关的信道测量系统要求信道测量波形应具有良好的相关特性,表 4 和图 4 分别示出了 4 种测量波形的自相关函数和峰值对次峰值比 (peak to off peak ratio, POP)。如表 4 所示, TM 波形的 POP 略低于多音信号。

表 4 4 种测量波形峰值对次峰值比

Table 4 POP of four waveforms

测量波形	峰值对次峰值比
多音波形	3.659 1
TM1.1	3.085 8
TM3.1	3.159 3
TM3.1a	3.234 3

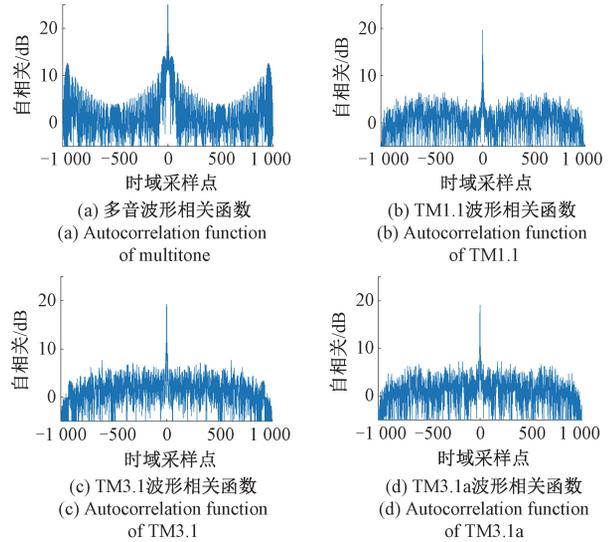


图 4 4 种测量波形相关函数

Fig. 4 Autocorrelation of four measurement waveforms

由上述对比结果可知,作为测量波形, TM 波形的性能略低于多音波形。然而,相比多音波形, TM 波形是 5G NR 定义的标准波形,并且在保持信道测量性能的同时,还可以实现 EVM 和 BER 等传输性能的测量。因此,本文选择 TM 信号搭建无线信道测量平台。

无线信道测量性能指标包括多径分辨率、多径时延窗和信道采样率等。以 10 MHz 带宽和 15 kHz 子载波间隔的 TM 信号为例,分析 TM 无线信道测量平台的测量性能。多径分辨率为测量信号带宽的倒数,它决定了可分辨的多径分量的最小传播时延差或路径差。由于信号带宽为 10 MHz,时延分辨率为 100 ns,可识别的多径分量传播路径差为 30 m。多径时延窗的长度大于最大多径时延与收发机传播时延之和。由于信号的子载波间隔为 15 kHz,该值决定了多径时延窗的长度,即  $1/15\ 000 \times 10^6 = 66.7\ \mu\text{s}$ 。信道采样率决定了最大多普勒频移,它必须大于两倍的 maximum Doppler shift。基于每一个 OFDM 符号生成一个信道冲激响应,完成一次信道采样,根据 TM 信号的帧结构,可实现信道采样率为 14 kHz,可测量最大多普勒频移为 7 kHz。

#### 1.4 测量信号接收处理

测量信号接收处理流程如图 5 所示。接收端上位机接收到 TM 基带波形后,首先进行频偏估计及校正,频偏估计基于 OFDM 符号循环前缀实现。完成频偏估计及校正后,基于解调参考信号 (demodulation reference signal, DM-RS) 实现接收波形定时同步。随后根据接收波形采样率及采样点数执行 OFDM 解调,得到接收波形资源网格。利用资源网格中 DM-RS 信号及生成包含 DM-RS 信号的参考资源网格实现信道估计及均衡,最后再根据调

制方式进行解码,获得接收码字。

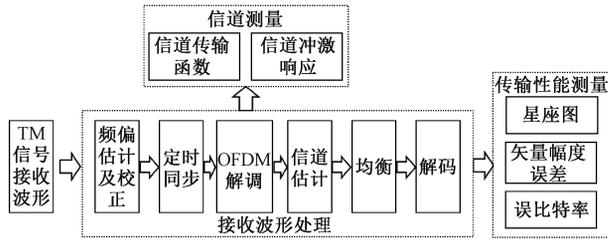


图 5 接收信号处理流程

Fig. 5 Process of the receiving signal

TM 无线信道测量平台的测量结果包括信道测量结果和传输性能结果。如图 5 所示,在接收端需要根据 TM 信号配置参数生成参考 TM 信号资源网格,利用生成的 TM 信号参考资源网格以及 OFDM 解调后得到的 TM 接收信号资源网格,可计算信道传输函数及信道冲激响应。

以给定时刻信道冲激响应为例,描述基于接收信号及参考信号频域计算信道冲激响应的方法。当获得接收 TM 信号和发射 TM 信号的资源网格后,可以得到 OFDM 符号的频域表示,发射符号和接收符号频域表示满足式(1)所示关系:

$$Y(f) = X(f)H(f) \quad (1)$$

其中,  $X(f)$  和  $Y(f)$  分别表示发射端和接收端 TM 信号中某个 OFDM 符号的频域表示,  $H(f)$  表示信道传输函数。因此,在接收端,可以通过接收 TM 信号和参考 TM 信号  $X_{ref}(f)$  频域相除得到信道传输函数,如式(2)所示,参考 TM 信号与发射端 TM 信号相同。

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X_{ref}(f)} \quad (2)$$

通过对信道传输函数进行逆傅里叶操作即可得到信道冲激响应。为了抑制旁瓣效应,可以先对信道传输函数采用汉明窗进行滤波,从而增强信噪比,如式(3)所示:

$$h(\tau) = IFFT\{H(f)W(f)\} \quad (3)$$

其中,  $W(f)$  表示汉明窗函数。功率时延谱(power delay profile, PDP)可以通过信道冲激响应得到,如式(4)所示:

$$P = |h(\tau)|^2 \quad (4)$$

信道冲激响应包含了信道全部信息。基于测量得到的信道冲激响应,可开展信道特性分析和信道统计性建模。信道特性分析包括路径损耗、阴影衰落等大尺度衰落参数和多径数量、多径时延扩展和多径功率比等小尺度衰落参数分析。

传输性能测量结果则是利用均衡后的资源网格及解码后的码字生成星座图、EVM 和 BER。由于 3GPP 标准中为 TM 信号定义了传输信息。当对接收信号进行处理

并获得资源网格后,可根据 TM 信号所采用的调制方式,生成相应的星座图并计算 EVM。当完成解码后,通过对比接收比特和已知的发送比特,利用错误比特数量除以总比特数量计算 BER。

## 2 测量平台验证

为验证 TM 无线信道测量平台测量性能,本章采用射频馈线直连验证、多径信道模拟验证和静态空口实测验证等 3 种方法开展 TM 无线信道测量平台验证测试。

### 2.1 射频馈线直连验证

射频馈线直连验证连接如图 6 所示。测量平台发射端和接收端通过射频线缆及衰减器连接。此时可以近似认为信道是理想,在验证测量平台功能的同时可以实现背对背(B2B)校准。射频馈线直连验证设置 TM 信号参数配置如表 5 所示。



图 6 射频馈线直连验证设备连接

Fig. 6 Device connection of direct connection verification

表 5 射频馈线直连验证测试配置参数

Table 5 Parameters for direct connection verification

参数	值
TM 信号	NR-FR1-TM1.1
子载波间隔	30 kHz
载波带宽	100 MHz
双工方式	FDD
中心频率	2.6 GHz
采样速率	200 MS/s

接收端得到的归一化功率时延谱如图 7 所示。为对比不同 OFDM 信号生成的信道冲激响应,图 7 分别给出了第 1、100、200、280 共 4 个 OFDM 符号生成的功率时延谱,4 个 OFDM 符号的功率时延谱是一致的。由于采用射频直连验证,功率时延谱只包含主径,无其他多径出现,这与预期是一致的。从图 7 中还可以看出,功率时延谱的动态范围是 35 dB。图 8 示出了射频馈线直连验证接收端解析的星座图。由于选择的 TM1.1 信号采用 QPSK 调制,星座图中包含 4 个点,其中“+”符号对应发射信号,“-”符号对应接收信号,EVM 的均方根(RMS)平均值为 1.819%,BER 为 0%。

### 2.2 多径信道模拟验证

为验证信道测量平台多径信道测量功能,基于信道模拟器开展验证测试。多径信道模拟验证测试设备连接

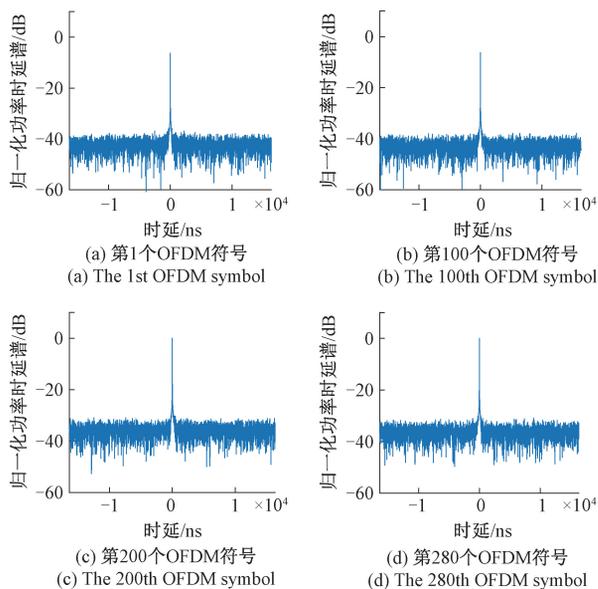


图 7 射频馈线直连功率时延谱

Fig. 7 PDP of direct connection verification

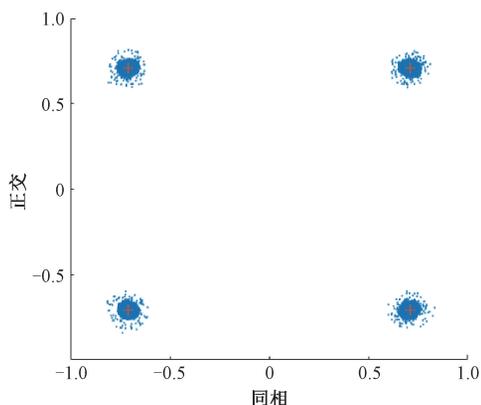


图 8 射频馈线直连星座图

Fig. 8 Constellation of direct connection verification

如图 9 所示。信号发射机通过射频线缆与信道模拟器输入端口连接,信道模拟器输出端口与信号接收机连接,信道模拟器实现多径信道模拟。

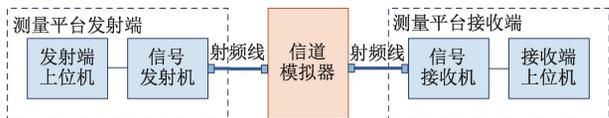


图 9 多径信道模拟验证设备连接

Fig. 9 Devices connection of multipath emulation verification

多径信道模拟验证测试中测量平台配置参数与射频馈线直连验证测试相同,如表 5 所示。信道模拟器配置参数如表 6 所示。信道模拟器设置了 4 条多径,4 条多径时延相差 40 ns,功率相差 5 dB。

表 6 信道模拟器配置参数

Table 6 Parameters for channel emulation

参数	值
中心频率	2.6 GHz
信号带宽	100 MHz
多径数量	4
多径相对时延/ns	0,200,400,600
多径相对衰减/dB	0,-2.5,-5,-7.5

接收端得到的归一化功率时延谱如图 10 所示。从结果可以看出,PDP 共包含 4 条多径,每条径的相对时延为 0、170、370、560 ns,每条径的相对衰减值为 0、-2.497、-5.192、-7.577 dB。多径数量、每条径的相对时延和相对衰减均与信道模拟器的设定参数基本一致,验证了 TM 无线信道测量平台多径测量能力。

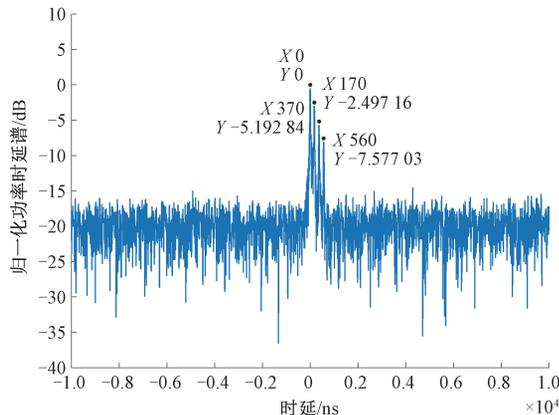


图 10 多径信道模拟验证测试功率时延谱

Fig. 10 PDP of multipath emulation verification

### 2.3 静态空口实测验证

为验证信道测量平台实测能力,利用 TM 无线信道测量平台开展了室内环境静态空口信道测量。静态空口实测验证测试设备连接如图 11 所示,测量发射端由发射端上位机、信号接收机、功率放大器和发射天线组成。测量接收端由接收端上位机,信号接收机和接收天线组成。天线采用全向鞭状天线。信号发射机与功率放大器通过射频线连接,功率放大器输出与发射天线连接,接收天线和测量平台接收端信号接收机连接。静态空口实测验证测试中测量平台配置参数与射频馈线直连验证测试相同,如表 5 所示。室内静态空口实测场景如图 12 所示。测量天线距离地面 1.2 m,针对收发天线相距 10 和 20 m 两种情况开展测量。

图 13 示出了室内静态空口实测场景收发距离分别为 10 和 20 m 的功率时延谱。从图中可以看出,收发天线之间存在明显的多径分量,其中有效多径使用“\*”符号标注。收发距离为 10 m 时,多径数量为 9 个,均方根

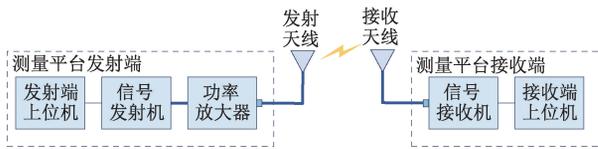


图 11 室内静态空口实测验证设备连接

Fig. 11 Devices connection of indoor air interface verification

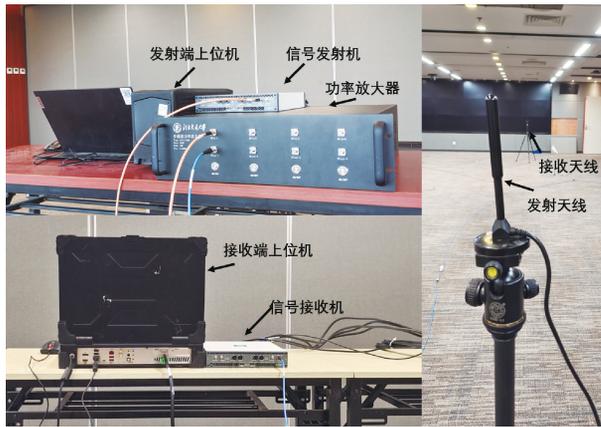


图 12 室内静态空口实测场景

Fig. 12 Scenario of indoor air interface verification

时延扩展为 60.28 ns,收发距离为 20 m 时,多径数量为 11 个,均方根时延扩展为 67.08 ns。两种距离对应的星座图如图 14 所示。收发距离为 10 m 时,EVM 的均方根平均值为 13.96%。收发距离为 20 m 时,EVM 的均方根平均值为 21.66%。两种距离对应的误比特率统计数据如表 7 所示,BER 为 0%,BER 为 0.17%。室内静态空口实测结果表明,5G TM 无线信道测量平台可以实现在空口条件下 CIR 的提取以及星座图,EVM 和星座图等传输性能的测试。对比收发距离 10 和 20 m 两种测量场景的测试结果,相比收发距离为 10 m,当收发距离为 20 m 时,信道中包含更多有效多径,较长的多径时延扩展,相应地,对应较大的 EVM 和 BER,即较差的传输性能,这与预期结果是一致的。

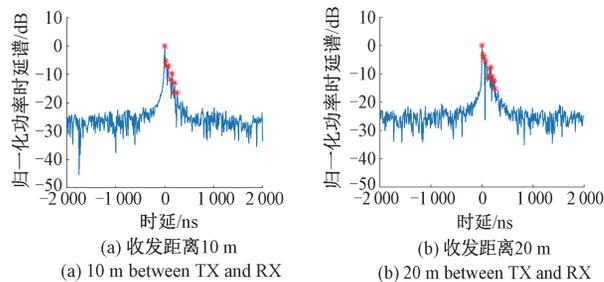


图 13 静态空口实测验证测试功率时延谱

Fig. 13 PDP of indoor air interface verification

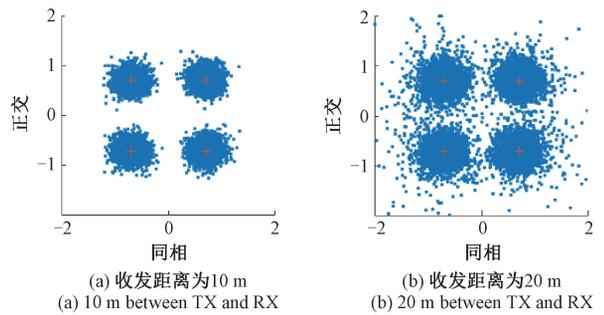


图 14 静态空口实测验证测试星座图

Fig. 14 Constellation of indoor air interface verification

表 7 误比特率测试数据

Table 7 Test data for BER statistic

数据	10 m	20 m
总比特数	84 240	84 240
错误比特数	0	184
BER	0%	0.17%

### 3 结 论

本文提出一种基于 5G NR TM 信号的信道测量平台并对测量平台功能进行验证。实现了 TM 无线信道测量平台的总体结构和信号处理流程设计,并基于 USRP 和高性能计算设备搭建了测量平台。从功率谱密度、峰均功率比、相关性和调制方式等方面,研究不同的 TM 信号的测量性能,并选择 TM1.1, TM3.1 和 TM3.1a 信号作为信道测量波形。通过射频馈线直连、多径信道模拟和静态空口实测 3 种测试方法,对 TM 平台的测量功能进行验证。TM 无线信道测量平台不仅可以实现信道测量,而且能够对 EVM 和 BER 等传输性能进行测试。搭建基于 TM 信号的毫米波无线信道测量平台是未来的研究工作。

### 参 考 文 献

[ 1 ] WANG C, BIAN J, SUN J, et al. A survey of 5G channel measurements and models [ J ]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20 ( 4 ): 3142-3168.

[ 2 ] HUANG J, WANG C, YANG Y, et al. Channel measurements and modeling for 400 - 600 MHz bands in urban and suburban scenarios [ J ]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(7):5531-5543.

[ 3 ] GUTIERREZ J D V, OESTGES C. Measurement-based large-scale propagation characterization in 5G micro-cells at 3.8 GHz [ J ]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(11): 11325-11335.

- [ 4 ] SANGODOYIN S, KRISTEM V, BAS C U, et al. Cluster characterization of 3-D MIMO propagation channel in an urban macrocellular environment [ J ]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(8) : 5076-5091.
- [ 5 ] MARTÍNEZ À O, NIELSEN J Ø, CARVALHO E D, et al. An experimental study of massive MIMO properties in 5G scenarios [ J ]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(12) : 7206-7215.
- [ 6 ] JIE X, ZHANG J, TIAN L, et al. Capacity analysis based on channel measurements of massive MU-MIMO system at 3.5 GHz [ C ]. 2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC). Chengdu, China: IEEE, 2017: 79-83.
- [ 7 ] GAO X, EDFORS O, RUSEK F, et al. Massive MIMO performance evaluation based on measured propagation data [ J ]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(7) : 3899-3911.
- [ 8 ] ZHENG Y, WANG C, YANG R, et al. Ultra-massive MIMO channel measurements at 5.3 GHz and a general 6G channel model [ J ]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(1) : 20-34.
- [ 9 ] YANG M, AI B, HE R, et al. A cluster-based three-dimensional channel model for vehicle-to-vehicle communications [ J ]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6) : 5208-5220.
- [ 10 ] YANG M, AI B, HE R, et al. Measurements and cluster-based modeling of vehicle-to-vehicle channels with large vehicle obstructions [ J ]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(9) : 5860-5874.
- [ 11 ] YANG M, AI B, HE R, et al. Dynamic V2V channel measurement and modeling at street intersection scenarios [ J ]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(5) : 4417-4432.
- [ 12 ] MIAO H, ZHANG J, TANG P, et al. Sub-6 GHz to mmWave for 5G-advanced and beyond: Channel measurements, characteristics and impact on system performance [ J ]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023, 41(6) : 1945-1960.
- [ 13 ] EISENBEIS J, TINGULSTAD M, KERN N, et al. MIMO communication measurements in small cell scenarios at 28 GHz [ J ]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(7) : 4070-4082.
- [ 14 ] CHIZHIK D, DU J, FEICK R, et al. Path loss and directional gain measurements at 28 GHz for non-line-of-sight coverage of indoors with corridors [ J ]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(6) : 4820-4830.
- [ 15 ] ZHANG P, YANG B, YI C, et al. Measurement-based 5G millimeter-wave propagation characterization in vegetated suburban macrocell environments [ J ]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(7) : 5556-5567.
- [ 16 ] HUANG J, WANG C, CHANG H, et al. Multi-frequency multi-scenario millimeter wave MIMO channel measurements and modeling for B5G wireless communication systems [ J ]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(9) : 2010-2025.
- [ 17 ] HUANG J, WANG C, FENG R, et al. Multi-frequency mmWave massive MIMO channel measurements and characterization for 5G wireless communication systems [ J ]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(7) : 1591-1605.
- [ 18 ] CAI X, YIN X, CHENG X, et al. An empirical random-cluster model for subway channels based on passive measurements in UMTS [ J ]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(8) : 3563-3575.
- [ 19 ] ZHOU T, TAO C, SALOUS S, et al. Channel sounding for high-speed railway communication systems [ J ]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(10) : 70-77.
- [ 20 ] ZHOU T, TAO C, SALOUS S, et al. Measurements and analysis of short-term fading behavior in high-speed railway communication networks [ J ]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(1) : 101-112.
- [ 21 ] WU T, YIN X, ZHANG L, et al. Measurement-based channel characterization for 5G downlink based on passive sounding in sub-6GHz 5G commercial networks [ J ]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(5) : 3225-3239.
- [ 22 ] 3GPP. Base station (BS) conformance testing Part 1: conducted conformance testing: TS 38.141-1 [ S ]. Sophia Antipolis Valbonne France: 3GPP, 2022.
- [ 23 ] 3GPP. Base station (BS) radio transmission and reception: TS 38.104 [ S ]. Sophia Antipolis Valbonne France: 3GPP, 2022.
- [ 24 ] MOLISCH A F. Wireless Communications [ M ]. Second edition. New York: John Wiley & Sons Inc, 2012.

## 作者简介



陈晨, 2019 年于北京理工大学获得博士学位, 现为北京交通大学助理研究员, 主要研究方向为无线信道测量与模拟。

E-mail: 98940301@bjtu.edu.cn

Chen Chen received his Ph. D. degree

from Beijing Institute of Technology in 2019. Now he is a research associate in Beijing Jiaotong University. His main research interests include wireless channel measurement and emulation.



**费丹** (通信作者), 2014 年于北京交通大学获得硕士学位, 现为北京交通大学实验师, 主要研究方向为无线信道测量与模拟。

E-mail: dfei@bjtu.edu.cn

**Fei Dan** (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Beijing Jiaotong University in 2014. Now he is a full technician in Beijing Jiaotong University. His main research interests include wireless channel measurement and emulation.



**郑鹏**, 2023 年于北京交通大学获得硕士学位, 现为北京交通大学博士研究生, 主要研究方向为无线信道测量。

**Zheng Peng** received his M. Sc. degree from Beijing Jiaotong University in 2023. Now he is a Ph. D. candidate in Beijing Jiaotong

University. His main research interest includes wireless channel measurement.



**艾渤**, 2004 年于西安电子科技大学获得博士学位, 现为北京交通大学教授, 主要研究方向为电波传播和信道建模。

**Ai Bo** received his Ph. D. degree from Xidian University in 2004. Now he is a professor in Beijing Jiaotong University. His main research

interests include radio propagation and channel modeling.