

第五代移动通信中信道测量的技术挑战与参考系统

文竹 孔红伟

是德科技（中国）有限公司

zhu_wen@keysight.com

关键词：信道测量，5G，毫米波

摘要

本文主要讨论如何利用商用通用化仪器仪表搭建毫米波 MIMO 信道测量系统，以满足 5G（第五代）移动通信对于无线信道传播特性测量的关键技术要求和挑战。本文基于最新一代的毫米波射频仪器和测量技术，提出了能够解决 5G 信道传播特性测量关键技术的信道测量平台框架和技术途径，搭建了 5G 毫米波 MIMO 信道测量的原型系统，并对原型系统的功能和性能进行了初步的讨论。

引言

在第四代移动通信技术（4G）已经成熟并商业化的今天，人们已经开始对下一代移动通信系统（5G）进行规划和研究。相比于 4G 演进式的发展，5G 被定义为“革命性”的移动通信系统。在各项系统关键指标要求上，相比已有的 4G 系统，5G 移动通信系统都有几个数量级的提高，例如：

- 100 倍的数据传输率提高
- 1000 倍的系统容量提升
- 100 倍的设备密集度
- 100 倍的能源效率提升
- 优于 1ms 的系统延迟
- 超过 99.999% 的系统可靠性

为了支持人们对于 5G 移动通信系统“革命性”的定义，5G 系统必然需要采用若干新的关键技术，其中业界广泛达成共识的三项核心技术包括：

- 使用高于 6GHz 的全新频段，包括亚毫米波（~30GHz）和毫米波（30GHz~）
- 超宽带技术，带宽从 500MHz 到 1GHz，甚至到 2GHz
- 大规模 MIMO（Multiple Input Multiple Output）技术，天线数目从几个到几百个

以上核心技术不仅对移动通信系统本身的设计、优化提出了新的挑战，同时对于作为无线信号传输媒介和通道的无线信道，其在 5G 移动通信条件下的传播特性，必然也需要进行详细的研究和理解。

回顾 4G 以及之前的无线信道测量研究，多集中于 6GHz 以下频段、100MHz 以下带宽的 SISO 或小规模 MIMO；而对于高频段、超宽带以及大规模 MIMO 条件下的无线信道传播特性，却缺乏深入的测量和研究。因此，5G 无线信道传播特性的测量，成为当前 5G 移动通信研究领域里的一个非常热门的课题。

在针对 5G 移动通信的信道测量研究工作中，最有代表性的是由纽约大学 T.S.Rappaport 教授带领的研究团队所开展的工作 [1~3]。在纽约大学的研究工作中所使用的是基于滑动相关方法 [7] 的 SISO 信道测量系统，该系统能够测量信道传播衰落以及多径延迟信息，对于多径的角度信息需要利用机械旋转平台和定向天线进行测量。而三星也利用类似的信道测量系统进行了在 28GHz 频段的测量研究 [4]。

上述信道测量系统存在如下限制：首先，基于滑动相关方法的信道测量系统其测量速度很慢，这意味着上述系统只能测量静态信道或者极低速运动信道。但是对于 6GHz 以上高频段，特别是毫米波频段，由于波长很短，即使在行人步行场景下多普勒频率也会达到上百赫兹，无法用基于滑动相关的信道测量系统进行测量；其次，为了对 MIMO（Multiple Input Multiple Output）信道进行测量，需要在发射和接收端使用天线阵列，并且天线阵元间距需要等于半波长。而方向性喇叭天线的尺寸远远大于毫米波频段的半个波长（<5 毫米）；第三，上述信道测量系统的搭建，采用了许多专门设计的设备和电路，开发周期长、难度大、系统性能和稳定性难以保证。

本文讨论如何利用商用的通用测试仪器，搭建毫米波超宽带 MIMO 信道测量系统，以满足 5G 移动通信的信道测量需求。

5G 信道测量的要求和技术挑战

对于 5G 信道测量，支持高频段、超宽带以及大规模 MIMO 成为对信道测量系统的基本要求。围绕 5G 信道测量系统，有 6 个方面的关键技术挑战需要加以解决，如图 1 所示



图 1 5G 信道测量系统关键技术

信道测量方法和系统架构

信道测量技术大致可以分为 3 类：宽带信号相关方法、滑动相关方法和扫频方法。宽带相关方法由于是同时对整个带宽内的信道冲击响应 (CIR) 进行测量，其测量速度远远快于其他两类方法，因此更适合 5G 信道测量的要求。

在支持多天线的技术上，出于测量速度和通道间抗干扰能力的综合考虑，应该采样发射端多天线切换发射、接收端并行接收的方法。

因此，系统的结构框图如图 2

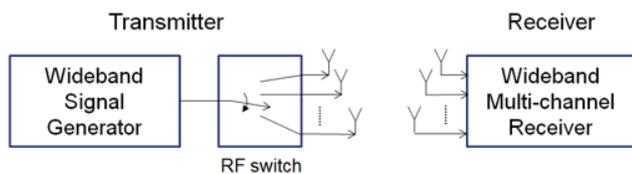


图 2 5G 信道测量系统结构框图

高频段信号产生与接收

在支持高频段，特别是毫米波频段信号产生与接收方面，使用高性能的商用毫米波射频仪器能够减小系统设计、搭建和使用的复杂程度。

在信号发射端，高性能的毫米波矢量信号源和固态射频切换开关能够满足毫米波频段信号的产生。

在接收端，模块化的多通道下变频器配合毫米波模拟信号源能够提供高精度多通道相参的下变频能力。

超宽带信号产生和采集

目前，商用的高性能任意波发生器能够产生高达数 GSa/s 的 I/Q 数据生成，而模块化的宽带多通道数据采集卡能够提供多通道相参的信号采集能力。

测量数据存储与流盘

为解决超宽带、多通道信道测量数据连续记录的问题，我们提出了一种基于实时处理压缩数据的方法：在数据采集卡采集数据后，利用 FPGA 编程对测量数据进行实时相关处理，得到 CIR (信道冲击响应) 数据，有效的 CIR 数据长度远远小于原始的测量数据，因此通过对 CIR 数据进行流盘和存储，能够在不损失信道信息的情况下大幅减小数据量，实现长时间连续测量。

信道参数估计方法

在各种信道参数估计方法中 [6,7]，SAGE 算法 [8] 是一种被广泛使用的基于最大似然估计的高精度多参数联合估计算法，同时 SAGE 算法在估计多径的能力上不受天线数目的限制，因此非常适合毫米波多径信道的估计。

系统同步与校准

为保证发射、接收之间的精确同步，采用高精度铷原子钟提供本振信号。

而高精度的系统校准也是保证整个测量系统性能的关键因素，系统的校准主要包括：

- 多通道间相位 / 幅度校准
- 天线校准
- 系统频率响应校准
- 功率和延时校准
- I/Q 幅相不一致校准

基于通用仪器的 5G 信道测量参考系统

基于上一节的讨论，我们搭建了 5G 毫米波超宽带 MIMO 信道测量的参考系统，系统原理框图如图 3

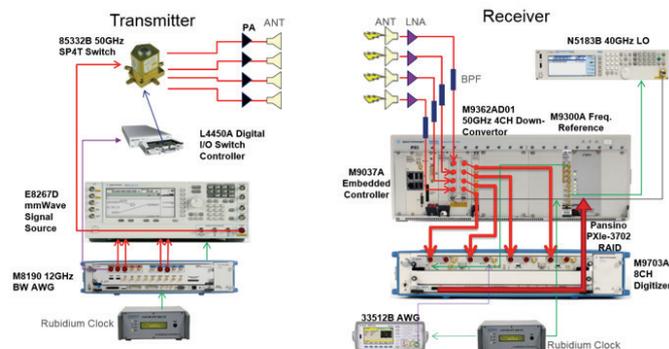


图 3 基于通用仪器的 5G 毫米波超宽带 MIMO 信道测量参考系统

除了定制的阵列天线以外，所有的仪器设备都采用了通用仪器和射频微波器件进行搭建：

- 信号产生部分，使用了模块化仪器 Keysight M8190A 超宽带任意波形发生器，配合高性能矢量信号源 Keysight E8267D，可以提供超过 2GHz 带宽，最高 44GHz 频率的超宽带调制信号生成的能力。再使用高速固态射频切换开关 Keysight 85332B 配合 64 通道数字 IO 控制器 Keysight L4450A，将单路射频输出信号分配到 4 路发射天线单元实现多天线分时切换发射。
- 信号接收部分，使用模块化 4 通道下变频器 Keysight M9362AD01 加上中频调理模块 M9352A 进行下变频和中频滤波放大，下变频本振信号由模拟信号源 Keysight N5173B 提供，可以实现 4 通道最高 40GHz，1GHz 带宽的下变频。数据采集由模块化 8 通道高速数字采集卡 Keysight M9703A/B 完成，在交织采用模式下，利用 M9703A/B 的 4 个通道能够实现 3.2GSa/s 采样率，1GHz 带宽的 4 通道相参数字采样。
- 系统同步方面，发射和接收子系统分别使用了一台高精度铷原子钟，在两台铷原子钟同步锁定后，能够提供准确度 1×10^{-12} 的本振时钟。同时，使用函数发生器 Keysight 33512B 产生与发射端 M8190A 同周期的脉冲信号触发 M9703A 进行数据采集，从而保证收发的时间同步。
- 上述系统具有良好的可扩展性，在发射端通过级联多级切换开关 85332B 可以将 4 路输出扩展到 16 路甚至更多，在接收端通过增加下变频模块 M9362AD01+M9352A，以及采样模块 M9703A，可以在保证相参精度的前提下，支持更多射频接收通道。

5G 毫米波超宽带 MIMO 信道测量系统的实物照片如图 4 所示：



图 4 信道测量系统实物照片

多径延迟与衰落精度测试

我们用信道模拟器仿真了一个 3 径信道（带宽 40MHz），用信道测量系统进行多径的测量，测量结果如表 1。

表 1 多径延迟与衰落精度测试结果

测量项目	测量结果
径延时分辨率	36ns
径延时误差	0ns
径衰落误差	0.11dB

接收机灵敏度测试

调整发射端的发射功率，直到接收端无法检测到接收信号，从而测试接收机的灵敏度。测试结果表明接收机灵敏度优于 -100dBm。

多径动态范围测试

使用信道模拟器仿真 2 径信道，调整两个径的相对功率，直到无法接收机同时检测到两个径为止，从而得到接收机能够同时接受到的多径的动态范围。测试结果表明接收机多径动态范围优于 64dB。

室内 MIMO LOS 信道测试

初步进行了室内 MIMO LOS (Line of Sight) 信道的验证测试。将收发天线无遮挡相对放置, 调整收发天线方向, 是的直达径 (LOS) 的 AoA (到达角) 和 AoD (离去角) 大致为 0° 和 15° 。利用信道测量系统进行 MIMO 信道估计, 测试结果如图 5



结论

论文讨论了 5G 信道测量的要求和技术挑战, 并提出了基于商用的通用化仪器搭建 5G 毫米波超宽带 MIMO 信道测量系统的方案和参考系统。测量结果表明该系统能够满足 5G 信道测量的需求。

参考文献

- 1.T.S.Rappaport, Shu Sun, etc. "Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!", Global Communications Conference (GLOBECOM), 2013 IEEE, 2013, pp. 3948 - 3953
- 2.Hang Zhao, T.S.Rappaport, etc., "28 GHz millimeter wave cellular communication measurements for reflection and penetration loss in and around buildings in New York city", Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on, 2013, pp. 5163 - 5167
- 3.J.N. Murdock, T.S. Rappaport, etc. "A 38 GHz cellular outage study for an urban outdoor campus environment" Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012 IEEE, 2012, pp. 3085 - 3090
- 4.D.C. Cox, "Delay Doppler Characteristics of Multipath Propagation at 910 MHz in a Suburban Mobile Radio Environment," IEEE Trans. On Ant. and Prop., vol. Ap-20, No. 5, pp. 625~635, Sept. 1973.
- 5.Sooyoung Hur, Yeon-Jea Cho, etc. "Synchronous Channel Sounder Using Horn Antenna and Indoor Measurements on 28 GHz", 2014 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), 27~30, 2014, pp.83~87
- 6.Pirkl, R.J. ; Georgia Inst. of Technol., Atlanta ; Durgin, G.D., "How to build an optimal broadband channel sounder ", Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE, pp 601 - 604
- 7.Hamid Krim, Mats Viberg, "Two decades of array signal processing research", Signal Processing Magazine, IEEE, July 1996, pp.67~94.
- 8.Someya, T.; Ohtsuki, T., SAGE Algorithm for Channel Estimation and Data Detection with Tracking the Channel Variation in MIMO System, Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM '04. IEEE, Volume 6, 29 Nov.-3 Dec. 2004 Page(s):3651 - 3655 Vol.6