

# MIMO Wireless Terminals OTA Performance Test Based on Boundary Array Methodology

Jiang Xiao<sup>1</sup>, Yulung Tang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ETS-Lindgren, Inc., China

<sup>2</sup>ETS-Lindgren, Inc., APAC

Email: [John.Xiao@ets-lindgren.com](mailto:John.Xiao@ets-lindgren.com)

Received: May 5<sup>th</sup>, 2014; revised: May 30<sup>th</sup>, 2014; accepted: Jun. 4<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

MIMO antenna technology is commonly used in high speed wireless communication (LTE, WIFI, WIMAX) as well as in high performance radar (MIMO radar). There are more and more wireless terminals with MIMO antenna around the current market. However, there are no current standardized measurement methodologies to evaluate the new technology. The main international standardization organizations, including 3GPP, CTIA and the national organization of China (CCSA), are working to standardize the test methodology. Part of the difficulty in completing a standard of the test method is due to the fact that channel models of multi-path environments complicate the test system to a large degree. Such complexity can be taken into account by the methodology based on boundary array OTA method that makes it a very important evaluation candidate for MIMO OTA performance test. The paper presents a real MIMO OTA test system. After the introduction of boundary array concept, the system calibration is described, including input and output calibration of the entire system. Subsequently, the system validation is examined from several aspects, such as power validation, filed mapping, temporal correlation and so on. Finally, the measurement results of an actual wireless product, with three different antennas, are provided to further elaborate the test methodology. At the end, the current status of the MIMO OTA test methodology standardization is provided to conclude the paper.

## Keywords

MIMO, Boundary Array, OTA, Channel Validation, Performance Test

## 基于边界阵列的多输入多输出无线终端的在空中无线测试方法

肖 疆<sup>1</sup>, 唐毓隆<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ETS-Lindgren Inc., 中国区

<sup>2</sup>ETS-Lindgren Inc., 亚太区

Email: [John.Xiao@ets-lindgren.com](mailto:John.Xiao@ets-lindgren.com)

收稿日期: 2014年5月5日; 修回日期: 2014年5月30日; 录用日期: 2014年6月4日

## 摘要

多输入多输出(Multiple Input Multiple Output: MIMO)天线技术在当前高速无线通信领域(LTE, WIFI, WIMAX), 高性能雷达技术(MIMO radar)等得到了飞速发展。市面上越来越多无线终端设备中具有MIMO天线技术, 但如何评估这种技术的测试方法却没有达到标准化。国际两大组织3GPP[1], CTIA[2]以及国内中国通信学会CCSA[3], 都在进行测试方法的标准化工作; 信道模型概念引入给系统带来复杂性使得进展较慢。其中基于边界阵列的多输入多输出无线终端在空中(Over The Air: OTA)测试方法是一种非常重要的评估方法。本文利用实际的测试系统为背景, 通过对边界阵列的方法概念引入, 测试链路和系统的校准方法, 多方面系统性能验证, 以及最终产品性能的测试, 希望能够较全面的给出此方法的介绍。同时展望此方法的发展前景和给出相对于其他方法的比较。

## 关键词

多输入多输出, 边界阵列, 在空中, 信道验证, 性能测试

## 1. 前言

随着中国经济的飞速发展, 云计算、大数据、智慧城市、物联网、现代通信、移动互联等技术领域使得人们从高能量消耗转向绿色低碳; 各种高科技创新转型一个一个被突破。其中 MIMO 天线技术是实现这些现代科技的一项无线领域的创新, 可解决整个行业所面临的一项问题; 它可提供更快的数据速率和更大的系统容量, 而且无需在时域或频域中投入更多资源。在一个  $m \times n$  MIMO 系统中, 理论最大数据速率只会受到  $m$  和  $n$  值中较小值的影响, 发射组件数量增大时可以改善系统信噪比, 从而改善系统的覆盖范围和质量。

MIMO 技术通俗来说像人的双耳朵, 可同时分辨多人的谈话实现和多人同时交流, 这样信道容量(即吞吐量)就成倍的增加。所以 MIMO 是在一定频谱带宽下, 利用多天线, 通过空时编码等技术, 传播信道中的非相关性, 来提高无线通信系统的信道容量的一种技术实现[4]。在传统的单天线通信系统(Single Input Single Output: SISO)中, 信道中的多径效应被看作恶化通信质量而需要用特别的技术进行处理, 但在 MIMO 系统中, 这些具有非相关性的子径则可以在数学算法的帮助下, 得以提高整个系统的性能。换句话说, MIMO 技术利用了传播环境中的极化域、空域、时域、频率域等维度, 将高速无线通信推向了一个新的级别。由于 MIMO 终端其算法依赖于信道环境, 也即实时智能地根据信道环境优化通信系统的性能, 这使得信道模型成为其理论与实现的重要参考依据。从发射信号端到接收信号端, 可以用射频通信信道来描述, 所以对信道的另一种新的理解是 MIMO 技术带来的突破。

图 1 是一个典型的 MIMO 信道链路, 它包括 MIMO 发射机, 造成多径的环境的传输路径(多径, 直达波)以及 MIMO 接收机。这些接收机就是需要高数据流量的无线终端。对于最终的 MIMO 无线终端性能测试与评估, 无论是研发阶段, 还是认证阶段, 都会强烈地依赖信道模型。传统无线终端一般利用在空中进行 SISO 最终性能评估, 是利用微波暗室建立一个无反射的准自由空间, 以便评估该无线终端的射

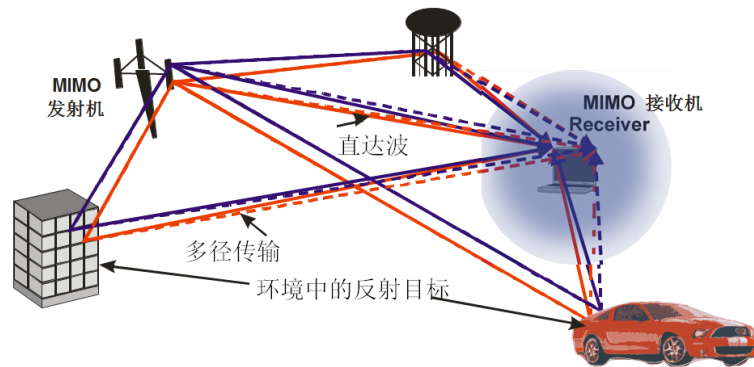


Figure 1. Typical case of MIMO wireless channel  
图 1. MIMO 信道链路典型情形

频及天线的整体性能；但是，为了评估多天线终端而提出的所谓 MIMO OTA 技术，则必须将信道模型在实验室中进行真实的复现，使 MIMO 终端测试变得真正的可重复、可控制。

目前国际组织 3GPP, CTIA 和国内组织 CCSA 针对 MIMO OTA 的终端测试，主要可能采纳的有三种方法。第一种测试方法是基于边界阵列的 MIMO 无线终端的在空中无线测试方法[5] [6]。它在微波暗室的环境下利用信道模拟器模拟 OTA 的多径环境，在被测设备周围，架设多个双极化天线探头阵列，模拟一个接近真实环境下各向不同到达角的衰落信道测试场景。信道仿真器将提供这个模拟的信道场景，从而在被测设备周围通过阵列形成一个场，这个场是以阵列为外边界的。故，这个方法通常被称为“边界阵列法”，利用有限阵列和可实现信道仿真去满足复杂的多变信道环境，而且可以升级到真实的 3D 场景[7]。第二种是拓展传统的暗室测试技术来评估多天线的性能[8]。该方法通过测量被测设备每根天线单元的矢量方向图信息，将得到的幅度和相位信息添加入信道模型中并数字化，从而评估其期望的辐射性能，也称为两步法。由于第一步测量矢量方向图以来产品本身具有测试功能，而且测试精度受到手机本身影响，会给测试带来误差不可控。第二步测试过程需要进行特定被测物的矩阵求逆。所以从目前这些来看的话，两步法不是一种典型的通用 OTA 测试方法，因而其适用性取决于待测试指标。第三种是基于混响室的方法[9] [10]。混响室是一个带有搅拌器的屏蔽室，通过机械或者频率搅拌在被测物周围形成随机的均匀富多径场，最终产生来自各个方向的统计均匀的分布场。但是，富多径环境是真实世界中比较不常见的场景，并且其传输延迟并不是通信链路的典型传输延迟。为了解决以上问题，目前混响室方法开始研究引入信道模拟器来实现仿真更长的时延和衰落。但是，对应不同到达角，直射波，空间相关性等信道的特点很难复现。更详细的比较可以参考 3GPP 和 CTIA 组织的报告 [2] [3]。

## 2. 基于边界阵列 MIMO 无线终端的在空中无线测试系统

图 2 是一个实际边界阵列 MIMO 无线终端的在空中无线测试系统图。它是可以满足目前 2X2MIMO OTA 测试的，由具有一台 MIMO 测试通信综测仪，一对功分器，一对 RF 信道仿真器，一对 8 通道放大器组，且每个放大器对应一个极化开关，最后微波暗室和其对应的边界阵列。如果 RF 信道仿真器有足够的输入输出端口，可以用一套仪器就可以满足，而且此系统的功分器也可不用。上行的信号链路通过圆极化通信天线帮助实现。测试时，待测物放置在暗室中心。图 3 是暗室中天线探头的布局，根据对相关区域的大小的要求，可以布局成 8 探头或 16 探头，甚至更多。当探头数为 8 的均匀分布在圆环上时，空间相关尺寸约为 0.7 个波长，也就是测试产品的尺寸为 0.7 个波长内就不会受探头数影响。下面章节讲述本系统的具体校准和系统验证。

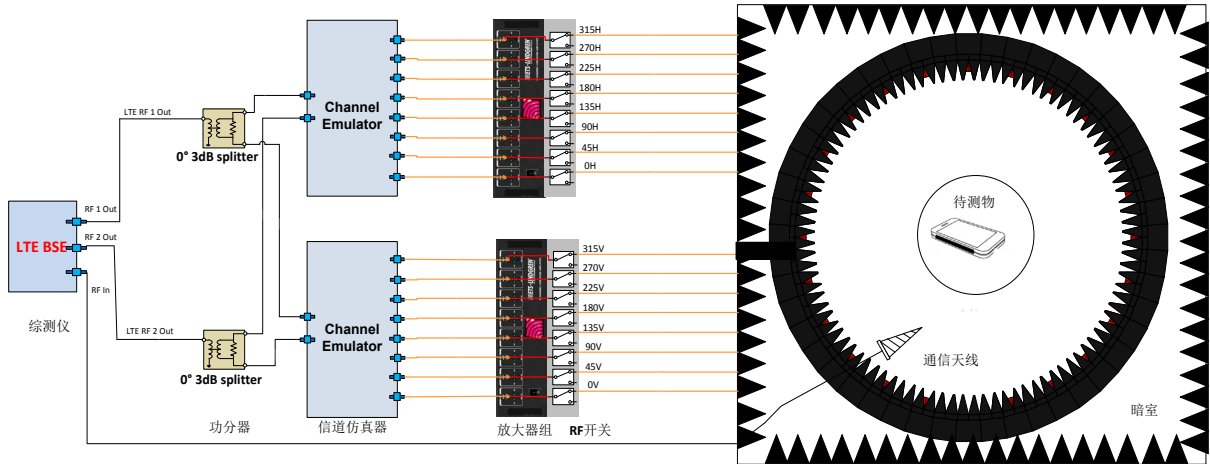


Figure 2. System of MIMO wireless terminals OTA performance test based on boundary array  
图 2. 边界阵列 MIMO 无线终端的在空中无线测试系统

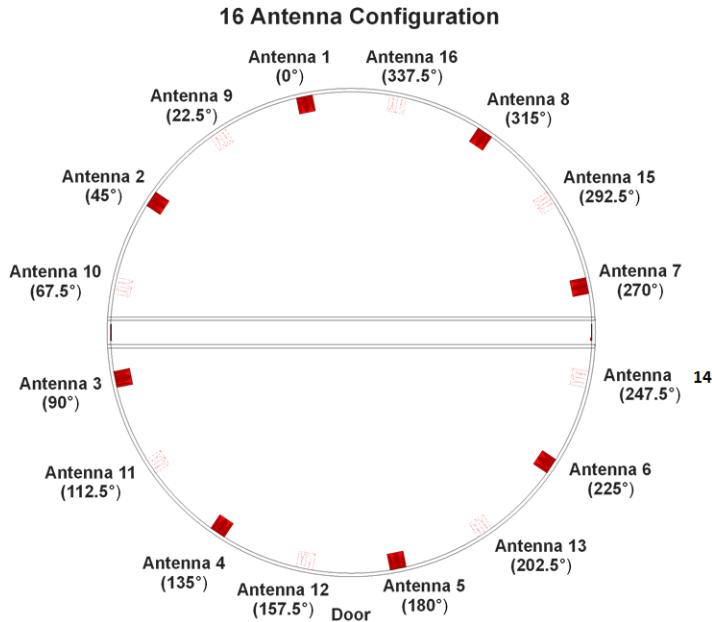


Figure 3. Antenna array arrangement inside chamber  
图 3. 暗室天线探头布局

### 3. 系统校准

由于此 MIMO OTA 测试方法的实现涉及到电磁场传播、信道建模、数字信号处理、仪器控制、软件驱动等多学科理论，所以系统校准也是一个较复杂综合性工作。对于一个由微波暗室中的边界天线阵列以及一个 RF 信道模拟器所组成的 RF 信道环境仿真测试系统来说，这一测试用于产生一个已知的由基站模拟器的发射端口通过阵列边界实现到暗室测试空间的信道模型，但是诸如信道模拟器输入输出电缆损耗、放大器增益、天线增益以及射频路径损耗等因素都会改变信道模拟器所生成的信道模型，因此必须对信道模拟器的输入输出进行预校正来调整消除信道模拟器所生成的各条路径间的相对幅度，甚至相位误差。系统校准工作主要包括三个基本步骤。图 4 是基于信道模拟器信道模型的系统校准框图，它是以 2 个发射机和 2 个接收机组成的 2X2MIMO 链路为例。第一步是通过测量信道模拟器各个输入口的相对

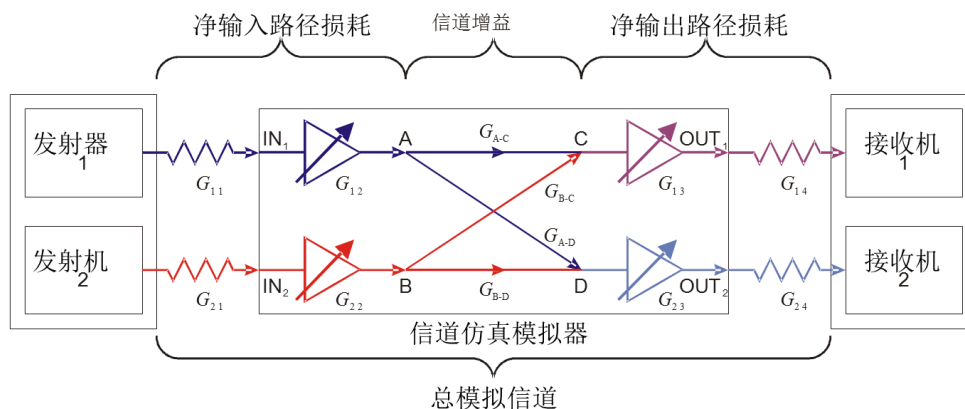


Figure 4. System calibration based on CE and its channel model  
图 4. 基于信道模拟器信道模型的系统校准

路径损耗对输入信号进行归一化，使用测量得到的相对偏差来调整每个 RF 输入口的参考电平，从而平衡输入信道模拟器的各路信号，使得净输入路径损耗： $G_{11} + G_{12} = G_{21} + G_{22}$ 。此步校正之后，挑选一个输入信号来对所有输出信号进行归一化，这里同样需要首先找到到达测试空间中心点的各条路径间的相对路径损耗，根据得到的相对偏差调整信道模拟器各路输出信号，从而使得信道模型中各路信号到达测试空间中心的路径损耗相等，使得净输出路径损耗： $G_{13} + G_{14} = G_{23} + G_{24}$ 。最后一步是校正系统最后点到点的路径损耗，其中包括了输入输出损耗、信道模型中的固有损耗(信道增益)以及与测试空间中天线数有关的阵列增益等。这样系统有源和无源的组件的损耗进行量化校准，结果可以在下一步得到验证。

## 4. 系统验证

系统校准后，通过一些测试可以验证整个系统是校准正确，误差是否在知道范围内，下面通过三个主要方面进行了验证，分别是静态场分布匹配验证，基于衰落信道模型的功率验证和信道模型时间相关性验证。

### 4.1. 静态场分布匹配验证

对于由微波暗室中的边界阵列天线所组成的 RF 环境模拟器来讲，真实信道环境的模拟质量主要取决于边界阵列天线的布局以及系统校准准确性。在一个理想的自由空间条件下，无穷多个平面波汇聚在同一点上将产生一个可预测的干涉场形，等效于一个各向同性的点源所发射出的球面波的波前经过一单一点窄缝所产生的干涉场形。当在二维空间上，如有限个探头天线(8个)在图3圆环，当每个探头到暗室中心是等幅同相的电磁波，在相当靠近圆心的区域，所形成的波形仍保留着良好的圆对称性，其中一部分空间的场结构与所期望的自由空间场结构相吻合，另一部分空间，场结构为十分复杂的干涉场型。通过使用一个一维线性定位器(slider)，可以移动一个探头天线，如图5所示，对测试空间内各点的矢量电磁场结构进行探测，形成一个二维电磁场空间分布，这里叫 Static Field Mapping (静态场分布匹配验证)测试。评估测试出的实际场结构分布与我们所预测的理想场结构的差距。其中期望场结构是给定分辨率下可计算的。这样就可以得知由于边界条件的分辨率所导致的结果偏差。而实测和理论结果之间所有额外的偏差则都反映了由于校准和测试空间内所不希望的反射所导致的偏离。图6是频率为 2620 MHz 时实际场匹配验证结果，其中左上角是实际测试结果，测试空间大小为半径为 30 cm 圆，右上图是理论计算的场分布，左下图是两者的差异，右下图是最大的误差和空间一维坐标。结果显示最大误差小于 15%，而且在 0.7 个波长(8 cm)内小于 10%。静态场分布匹配验证是一个矢量场测试，所以系统各通道的相位和

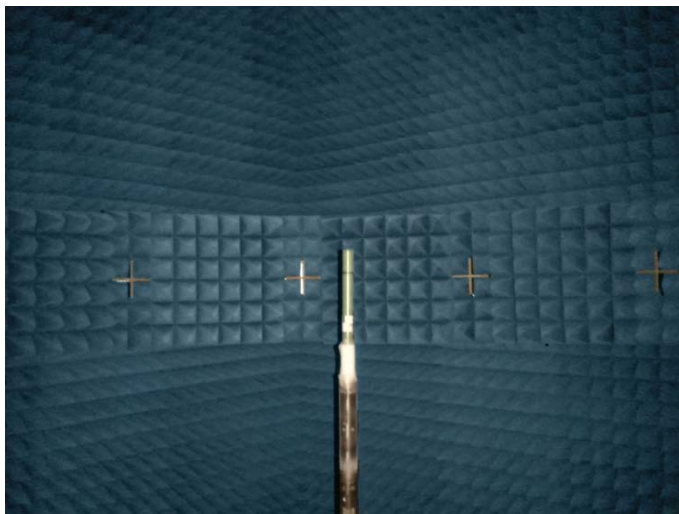


Figure 5. Dipole antenna inside MIMO system chamber for validation  
图 5. 在暗室中用于系统验证的偶极子天线

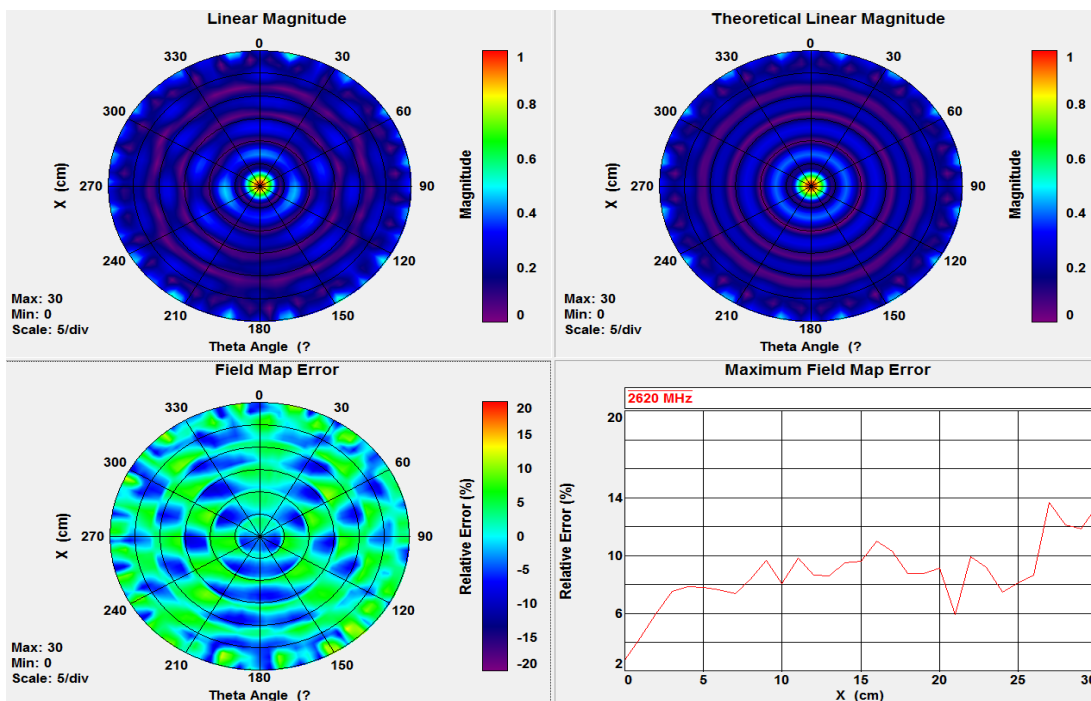


Figure 6. Validation results of static field mapping  
图 6. 静态场匹配验证结果

幅度误差和波长有关，对于越高的频率，精度的要求就越高。

场匹配验证仅仅是最为简单的信道模型(Single Tap)，和实际测试信道模型(3GPP Spatial Channel Model Extended: SCME UMI/UMA)不同的，所以为了更好地对系统验证，需要考虑实际信道模型增益。下面的信道验证都是基于实际带衰落信道模型的。

#### 4.2. 基于衰落信道模型的功率验证

表 1 是基于信道模型 SCME UMI/UMA 的下行功率和交叉极化比验证。设置的暗室测试区域的功率

电平为-62 dBm, 分别用偶极子测试垂直和水平极化的功率。在两个信道模型下, 功率最大偏移小于 1 dB, 交叉极化比偏移小于 0.4 dB。此测试没有用 LNA 对接收信号进行提高 SNR, 根据经验, 结果可得到一定的提高到半个分贝内。

### 4.3. 信道模型时间相关性

图 7 是基于信道模型 SCME UMI/UMA 的时间相关性, 其对于在谱域就是 Doppler。但是时间相关性更能够看出实际测试精确性, 在 3 个波长范围内, RMS 误差小于 0.05。

## 5. 终端最终性能测试

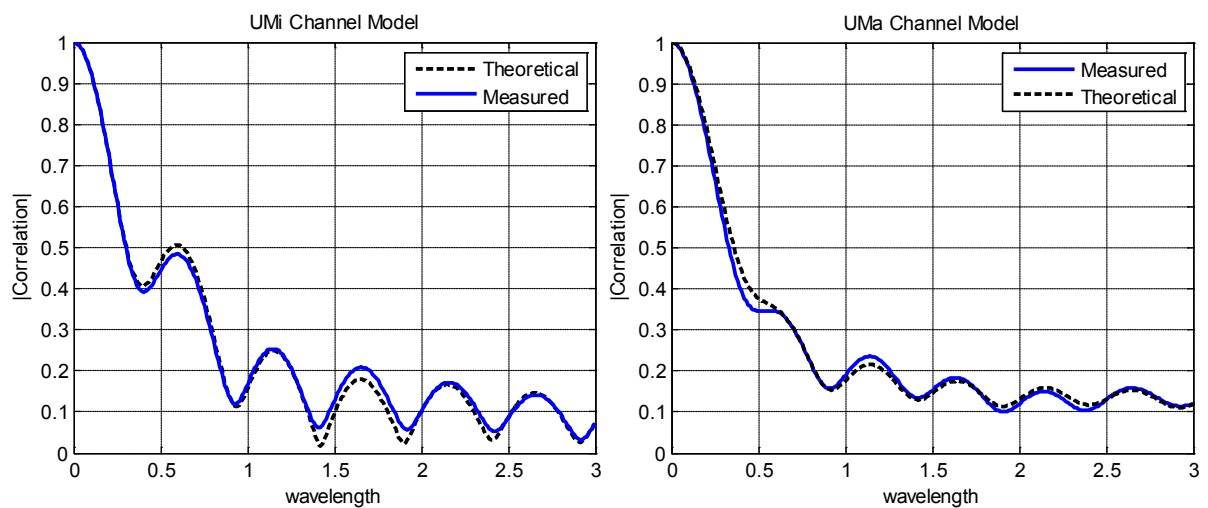
对于终端最终性能测量参数, 数据吞吐量是目前大家公认的 MIMO 主要的评价条件指标。对于传统的 SISO 的 TRP 和 TIS, 其主要是评估被测设备在传输链路上的性能; 而多天线 MIMO OTA 性能在于评价带宽层面数据量速度的性能, 即在什么情况下吞吐量下降到业务的服务质量不可承受的临界值。图 8 是同一被测物在三个性能不同天线(Good, nominal, bad)下性能对比。此 MIMO OTA 测试系统具体相关参数见表 2。事先我们也可以通过无源测试知道三天线性能, 再通过天线的包络相关系数(Envelop Coefficient Correlation: ECC)计算得到。从结果看出, 天线无源性能和 OTA 吞吐量评价是一致的。

## 6. 结论

本文在当前无线终端发展飞速的背景, 讨论了一种基于边界阵列的 MIMO 无线终端的在空中无线测

**Table 1.** Results validation of power validation and cross-polarization  
**表 1.** 功率和交叉极化比验证结果

Channel Model	SCME UMI	SCME UMA
Target Power (dBm)	-62	-62
Measured Power (dBm)	-62.9	-62.3
Theoretic XPR (dB)	0.81	8.13
Measured XPR (dB)	0.82	7.82



**Figure 7.** Results of temporal correlation  
**图 7.** 时间相关性验证结果

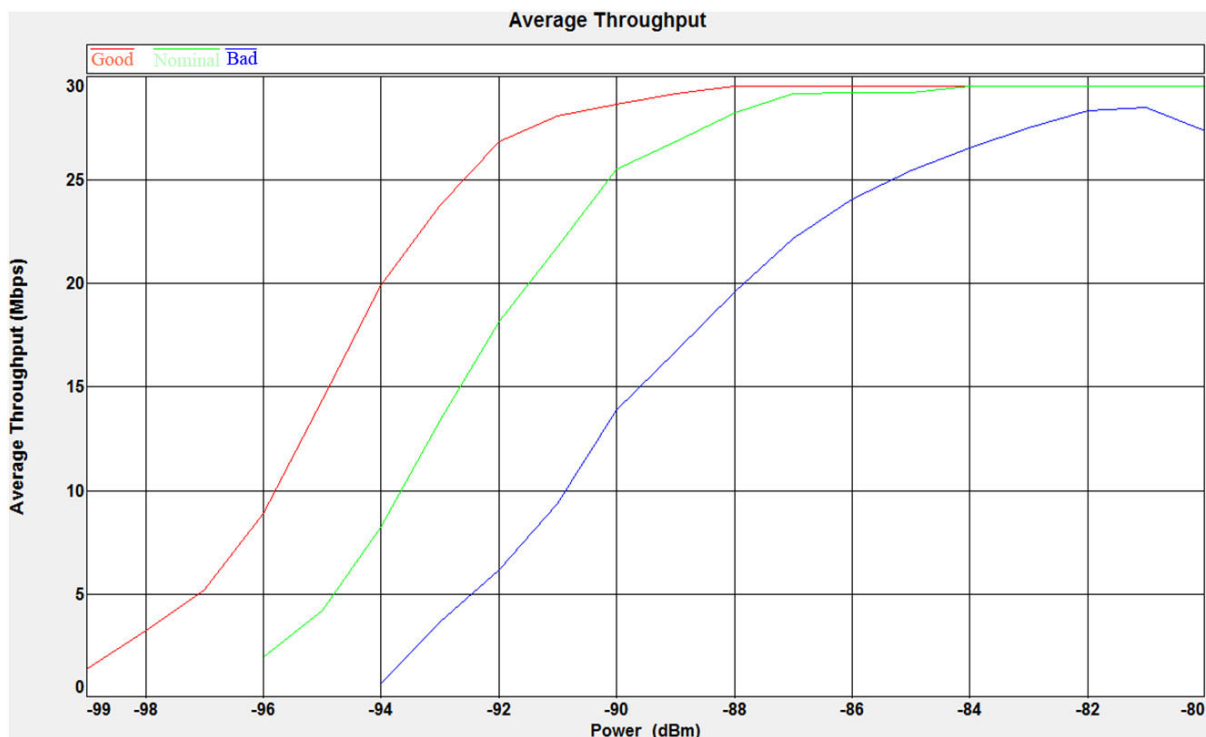


Figure 8. Results comparison of throughput measurement of DUT with three antennas

图 8. 同一被测物在三个性能不同天线性能对比

Table 2. MIMO OTA test system parameters

表 2. MIMO OTA 测试系统参数

测试系统名字	ETS-Lindgren AMS8700
微波暗室尺寸	5 × 5 × 5 m
边界阵列单元数	8
阵列单元类型	3165-01 双极化 Vivaldi 天线
探头到中心距离	1.95 m
测试信道模型	SCME UMI
待测物	手机

测试方法。结合一个典型系统工作背景，详细地介绍了系统组成，系统校准，以及系统的性能验证。其中性能验证从静态场分布匹配验证，测试区功率电平和交叉极化比等分别说明。最后给出了实际被测物在三中不同天线下的测试结果，最大差异能够有 6 dB 以上。基于边界阵列单元 MIMO OTA 测试技术是一个非常可能复制时间无线产品工作场景的,对无线产品的数据吞吐测试非常具有实际和理论背景支持的。相关技术细节，在将来的文章进一步讨论。

CTIA 组织的目标是在 2014 年末完成一个测试方法的标准化，当然驱动力量主要来自技术可信度而不是时间节点。3GPP 组织也开展自己的一些相关的工作项目，但是预计的完成日期还属未知。它可能会额外地规定使用其标准中测试方法时的性能要求，这一最终步骤可能将会占用大量时间。国内 CCSA 的 MIMO OTA 测试方法草案已经确认此方法为主要测试评估手段，两步法为候选方案。



## 参考文献 (References)

- [1] 3GPP, LTE, Technical Report, 2010. <http://www.3gpp.org/LTE>
- [2] CTIA (2014) CTIA Official Website, Washington DC. <http://www.ctia.org/>
- [3] CCSA China (2014) <http://www.CCSA.org.cn>
- [4] Kyösti, P., Jämsä, T. and Nuutinen, J.-P. (2012) Channel modelling for multiprobe over-the-Air MIMO testing. *International Journal of Antennas and Propagation*, **2012**, Article ID: 615954.
- [5] Szini, I., Foegelle, M., Reed, D., Brown, T. and Pedersen, G.F. (2014) On antenna polarization discrimination, validating MIMO OTA test methodologies. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **13**, 265-268.
- [6] Foegelle, M. (2008) Systems and methods for over the air performance testing of wireless devices with multiple antennas. US Patent No. 20080056340 A1.
- [7] Fan, W., Sun, F., Kyösti, P., Nielsen, J., Carreño, X., Knudsenand, M. and Pedersen, G. (2013) 3D channel emulation in a multi-probe setup. *Electronics Letters*, **49**, 623-625.
- [8] Jing, Y., Zhao, X., Kong, H.W., Duffy, S. and Rumney, M. (2012) Two-stage over-the-air (OTA) test method for LTE-MIMO device performance evaluation. *International Journal of Antennas and Propagation*, **2012**, Article ID: 572419.
- [9] Kildal, P.-S., Chen, X., Orlenius, C., Franzén, M. and LötböckPatané, C. (2012) Characterization of reverberation chambers for OTA measurements of wireless devices: Physical formulations of channel matrix and new uncertainty formula. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **60**, 3875-3891.
- [10] Chen, X., Kildal, P.-S. and Gustafsson, M. (2013) Characterization of implemented algorithm for MIMO spatial multiplexing in reverberation chamber. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **61**, 4400-4404.