

导读:为了应对未来移动通信、新体制雷达、物联网、航空航天信息技术等的飞速发展,作为其中关键技术的射频微波技术,也应从设计理论、仿真方法、工程应用和测试系统等方面不断地取得新进展、新突破、新发明。

为了加强国内同行在射频微波领域的学术交流,促进微波技术应用水平的提高,《电子技术应用》杂志2020年第7期和第8期推出“射频与微波”主题专栏,论文内容涵盖多种形式多个频段的功率放大器、微波系统、天线和无源元件设计,及电磁仿真、测试技术等。本专栏作者大多为工程一线的科研人员,论文都具有鲜明的工程应用背景,期待与读者互相切磋借鉴,共同提高我国的微波应用水平。本期将刊出上半部分。



特约主编:谢拥军,北京航空航天大学电子信息工程学院教授,博士生导师。主要研究方向为天线与微波技术、计算电磁学及其应用、电磁兼容等。目前主持多项国家纵向和企业横向科研项目。发表学术论文200余篇(其中SCI论文70余篇),主编(或参编)《HFSS原理与工程应用》、《简明微波》等专著8本。

5G 平面波模拟器的研制与应用^{*}

王正鹏,乔兆龙,张雨生,孙雪蕾,朱诗瑶,谢拥军,苗俊刚

(北京航空航天大学 微波感知与安防应用北京市重点实验室,北京 100191)

摘要:5G平面波模拟器是一种新型的空口测量系统,通过对系统中阵列天线各个天线单元进行合理的幅度相位激励,在近场距离合成准平面波。在准平面波环境中既可以进行传统的无源天线指标测量,又可以进行基站射频指标和系统性能指标测量。平面波模拟器系统能够有效压缩测量空间,从而大大节省测量系统成本,是空口测量取代传统传导测量的一种重要技术方案。从5G平面波模拟器的发展历程、设计方法及应用等几个方面进行了论述。

关键词:5G;平面波模拟器;空口测试

中图分类号:TN98

文献标识码:A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.200499

中文引用格式:王正鹏,乔兆龙,张雨生,等.5G平面波模拟器的研制与应用[J].电子技术应用,2020,46(7):1-6.

英文引用格式:Wang Zhengpeng, Qiao Zhaolong, Zhang Yusheng, et al. The development and application of plane wave generator in 5G[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(7): 1-6.

The development and application of plane wave generator in 5G

Wang Zhengpeng, Qiao Zhaolong, Zhang Yusheng, Sun Xuelei, Zhu Shiyao, Xie Yongjun, Miao Jungang

(Beijing Key Laboratory of Microwave Sensing and Security Applications, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The plane wave generator(PWG) is a novel measurement system for 5G over the air(OTA) testing. A quasi plane wave in the near-field is synthesized by exciting the antenna elements in the PWG array gracefully. The PWG system does not only meet the requirements of traditional passive antenna measurement, the radio frequency(RF) parameters as well as system performance of the base station(BS) can be accurately measured in the same system. The application superiority of the PWG system is the spacing saving ability, resulting in a significant cost saving, which prompt it to become an alternative solution of the traditional conducted measurement technology. In this paper, the developing history, the design process and typical scenarios in 5G application of the PWG system are proposed.

Key words: 5G; plane wave generator; over the air testing

^{*} 基金项目:国家科技重大专项(2018ZX03001028)

0 引言

移动通信技术在近 40 年的时间里取得了飞速的发展,如今进入到了 5G 时代^[1-5]。5G 通信系统涵盖了一系列新的关键技术,其中包括:大规模天线阵列、超密集组网、新型多址、全频谱接入和新型网络架构等^[6]。基站是构成移动通信网络的重要组成设备,5G 基站天线采用了大规模多输入多输出(Massive Multiple Input Multiple Output, Massive MIMO)天线阵列,其天线单元数目相较 4G 基站有了明显的提高^[7-9]。与此同时,基站天线与后端射频组件的集成度也已经大大提高,部分 5G 基站天线已经不再提供测试端口,这些新的特点都促进了空口(Over the Air, OTA)测试技术的快速发展^[10-12]。

OTA 测试不需要在被测基站天线上连接复杂的测试线缆,而只是以辐射的方式对基站天线整机进行测试。目前可用于 5G 基站天线 OTA 测试的传统测试场包括:室内远场、紧缩场(反射式)和多探头球面近场^[13]等。然而室内远场所需空间过大,紧缩场造价较为昂贵,多探头球面近场需要对测试数据进行近远场变换,无法对基站部分射频信号和业务信号进行直接测量^[10]。平面波模拟器是一种新型的可用于 5G 基站天线测量的 OTA 测试装置,其通过天线阵列和幅相调控网络在近场距离生成天线测试所需的准平面波环境,从而满足天线远场测试条件。平面波模拟器具有尺寸紧凑、造价适宜和可以使用远场测试方式对 5G 基站天线射频和业务信号进行直接测量的能力^[14-18]。

从 1984 年开始,已有众多研究人员对平面波模拟器进行了广泛的研究,美国国家标准局的 HILL D A 首先提出了在近场区域使用相控阵列合成平面波用于电磁敏感测试的理论^[19-20]。2002 年, COURTNEY C C 搭建了一个简易的平面波模拟器系统,测量过程采用了分时采样的方法^[21]。2003 年,犹他州州立大学的 HAUPT R 使用遗传算法对一种均匀线阵平面波模拟器进行了仿真,所设计的静区平面波幅度波动小于 2 dB,相位波动能够小于 1°^[22]。2009 年,意大利学者 D'URSO M 为了节约仿真时间,提出了平面波模拟器的稀疏布阵方法^[23]。2012 年,北京航空航天大学王辉采用喇叭阵列天线的架构对平面波模拟器进行了仿真设计^[24-25]。2013 年, BUCCI O M 结合前人的研究结果,给出了平面波模拟器的一系列设计指南^[26]。而近年来,为了解决 5G 基站 OTA 测试面临的诸多挑战,一些研究人员开始将平面波模拟器作为一种 5G OTA 测试系统展开深入研究^[14-18]。

本文主要针对北京航空航天大学在 5G 平面波模拟器的设计方法、系统实现及典型应用方面的工作进行重点的介绍和论述。

1 平面波模拟器的设计方法

平面波模拟器的原理框图如图 1 所示。平面波模拟器由多个探头天线单元组成平面天线阵列,每路天线单元通过幅相调控网络配置激励权重。通过优化设计平面

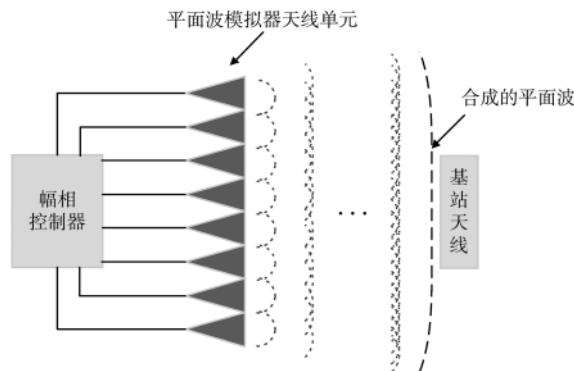


图 1 平面波模拟器原理框图

波模拟器各单元的权重,可以使平面波模拟器在其近场距离(例如 1 m~2 m 之间)合成满足远场测试条件的准平面波。合成的平面波所在区域被称为静区,基站天线在测试中放置于静区中,基站天线与平面波模拟器天线阵面对面放置。

1.1 传统的遗传算法优化设计方法

平面波模拟器阵列各单元的权重与静区内各采样点电场值的计算关系能够通过经典的电磁场积分算式计算,本文不再赘述。然而在平面波模拟器的设计中需要采用合理的优化算法设计出平面波模拟器天线阵列的分布和权重,从而在近场静区合成符合远场测试要求的准平面波。遗传算法是一种传统的阵列设计优化算法,已经有众多学者使用遗传算法对平面波模拟器进行了优化设计^[22-23, 26-27]。

本文直接采用实数编码方式,将平面波模拟器各辐射单元的馈电幅度变化限定在(0, 1),相位限定在(0, 2 π),生成一定规模的本区间的随机数,表示为初始解空间。

选取目标函数为幅度偏差和相位偏差的加权和函数:

$$f = a \cdot (\max(\text{amp}) - \min(\text{amp})) + b \cdot (\max(\text{phase}) - \min(\text{phase})) \quad (1)$$

其中, amp 和 phase 分别为观察区域采样点电场的幅度和相位; a 和 b 分别为幅度偏差和相位偏差的权重值。因期望得到目标函数的最小值,以目标函数倒数 1/f 作为优化算法的适应度函数。

对解空间的每个解依据上述适应度函数采用轮盘赌算法进行择优选择,然后对选择得到的解依据线性交叉法交叉重组,随机数替代法变异进行遗传优化操作。最后设置最大迭代次数,超过该迭代次数即终止进程。

通过以上操作不断迭代,最终获得静区性能良好的准平面波,并计算得到平面波模拟器各辐射单元的激励权重。由于本优化方法中,式(1)中的变量较少,有利于快速获得初始的阵列单元配置。在此基础上引入的遗传算法提高了优化效率并获得了鲁棒性较好的激励权重。

1.2 口面场卷积分法

使用直接的积分方法与遗传优化算法设计平面波模拟器具有算法依赖度高和缺乏物理规律的缺点。反射

射频与微波 RF and Microwave

式紧缩场设计中依据的近场波束聚焦原理可以延用到阵列结构平面波模拟器的设计中,其中涉及的口面场卷积积分法可以提高近场计算的速度^[17,28],具体计算方法如下。静区内任意观察点的电场可以表示为:

$$\vec{E}_P(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi} \int_D [\hat{R} \times (\hat{n} \times \vec{E}_A)] (1 + jkR) \frac{e^{-jkR}}{R^3} ds' \quad (2)$$

其中, D 是平面波模拟器天线阵列的口面, \hat{R} 是源点指向静区观察场点的位置矢量, $R = |\hat{R}|$ 是平面波模拟器阵列单元和静区观察点的距离, x, y, z 是静区观察点的坐标。 \vec{E}_A 是阵列口面切向电场, 可以表示为:

$$\vec{E}_A = E_{Ax} \hat{x} + E_{Ay} \hat{y} \quad (3)$$

其中, E_{Ax} 和 E_{Ay} 分别表示 \vec{E}_A 在 x 和 y 方向的分量。因此, 式(2)可以展开为:

$$E_x(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \int_D [E_{Ax} z (1 + jkR)] \frac{e^{-jkR}}{R^3} ds' \quad (4)$$

$$E_y(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \int_D [E_{Ay} z (1 + jkR)] \frac{e^{-jkR}}{R^3} ds' \quad (5)$$

当位置 z 确定后, 则式(4)和式(5)可以转化为二维卷积形式, 即:

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y) \quad (6)$$

其中, $g(x, y)$ 是输出响应函数, \otimes 表示卷积运算, $f(x, y)$ 是输入激励函数, $h(x, y)$ 是空间网络响应函数, 可以表示为:

$$h(x, y) = (1 + jkR) \frac{e^{-jkR}}{R^3} \quad (7)$$

式(6)中卷积运算可以使用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)和逆傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)进行快速计算。

当平面波模拟器的尺寸和单元间距确定后, 便可以开始进行单元激励幅度和相位的优化设计。在平面波模拟器的权重优化设计中可以引入口面场分布函数计算近场的准平面波, 口面场分布函数可表示为:

$$e = \left[1 + \left(\alpha \frac{|x|}{A} \right)^\beta \right]^\gamma \left[1 + \left(\alpha \frac{|y|}{A} \right)^\beta \right]^\gamma \quad (8)$$

其中, A 是口径边缘长度的一半, x 和 y 分别为阵面阵列单元位置坐标, α, β 和 γ 是 3 个待优化参数。通过优化 3 个参数, 可以分别计算激励幅度和相位的分布。该分布函数也可以被称为锥削函数。在对阵列激励进行初步设计基础上进一步采用遗传算法等进行优化能够有效提升静区优化的效率和优化结果的鲁棒性。

2 北航在平面波模拟器上的研制进展

近年来实验室开发完成了多代 5G 平面波模拟器。2017 年 10 月份开发实现的第一代单极化波导阵平面波模拟器如图 2 所示, 在此阶段首先完成了平面波模拟器系统布局设计、阵面设计、静区扫描、误差分析等工作。

2018 年 2 月开发实现的第二代双极化 PCB 平面阵平面波模拟器如图 3 所示, 此平面波模拟器完成了双极

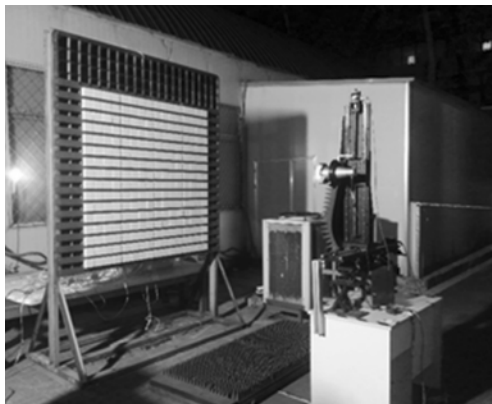


图 2 单极化波导阵平面波模拟器



图 3 双极化 PCB 平面阵平面波模拟器

化设计、阵面平面度优化、馈电网络设计等工作, 实现了一款具有紧凑结构、双极化精确馈电的平面波模拟器。

2018 年 6 月推出的第三代双极化波导平面阵平面波模拟器如图 4 所示, 该款平面波模拟器完成了波导双极化设计、空口校准、待测天线方向图测量、射频指标测量等工作, 并且在权威评测机构对主流基站厂商的设备进行了测试验证。

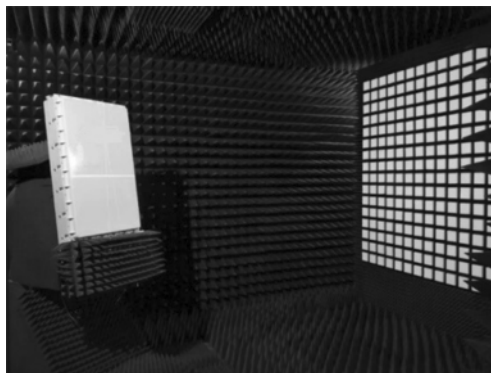


图 4 双极化波导平面阵平面波模拟器

典型双极化波导结构平面波模拟器 3.5 GHz 静区电场分布如图 5 所示。静区的测量范围为 0.9 m×0.9 m, 图 5(a)中幅度分布的波动小于 1.5 dB, 图 5(b)中相位分布的波动小于 15°。

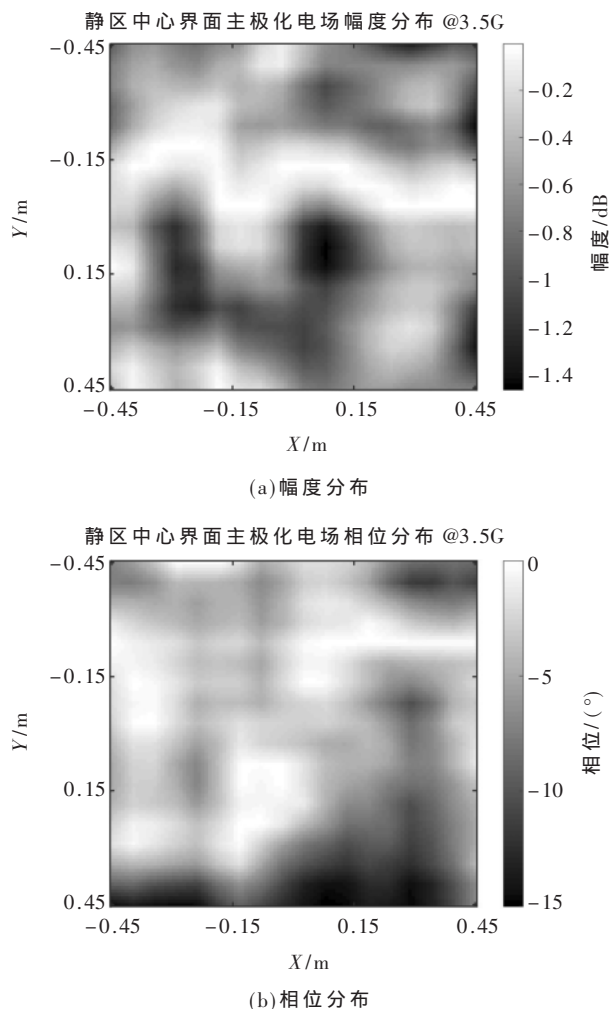


图5 双极化波导结构平面波模拟器 3.5 GHz 静区电场分布

5G 基站天线方向图在平面波模拟器与紧缩场中测试结果比对如图 6 所示,其中实线为使用图 4 所示平面波模拟器测试的结果,虚线为使用紧缩场测试的比对结果。使用两种场地测得的基站天线方向图较为吻合,在

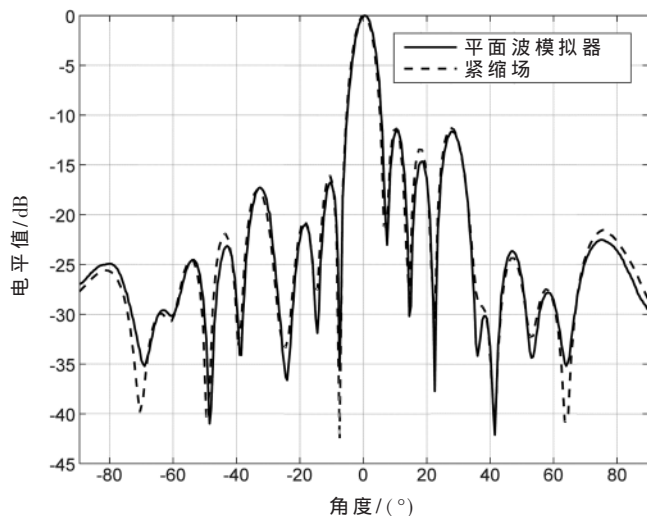


图6 5G 基站天线方向图在平面波模拟器与紧缩场测试结果比对

指向角度较大的位置个别方向图零深有较大差异。

2020 年是中国 5G 商用元年,几十万台 5G 基站天线将布设在各地。当基站天线下线速度快、测试量骤增时,如何在产线对基站天线进行现场测试评估就显得尤为重要。本实验室开发的产线测试平面波模拟器北航 PWG-63 如图 7 所示,该款平面波模拟器于 2019 年验证完成,其结构尺寸进行了进一步缩减,成本也得到了降低。产线测试平面波模拟器的应用范围很广,能够支持基站或手机天线产线测试、OTA 射频指标测量和产品线质量检测等。



图7 产线测试平面波模拟器北航 PWG-63

产线测试平面波模拟器的技术指标如表 1 所示。静区能够覆盖主流基站天线的口径范围,交叉极化极低。静区内准平面波的幅度波动(峰-峰值)<2 dB,相位波动(峰-峰值)<12°,能够满足天线远场测试条件。测试箱的整体外尺寸为 1.6 m×2.0 m×2.4 m,能够方便地在楼宇内进行移动和安置。

表1 产线测试平面波模拟器技术指标

参数	量值
系统带宽/GHz	2.4~3.8
静区规格/mm	550×850×300
交叉极化/dB	<-27
极化	单一线极化
静区幅度波动/dB	<2
静区相位波动/(°)	<12
尺寸规格/m ³	1.6×2.0×2.4
重量/kg	<500

3 平面波模拟器的典型应用

主流的 5G 基站天线均采用了有源一体化设计,然而部分 Sub-6 GHz 的 5G 基站天线仍然可以保留测试端口。因此对于 5G 基站的测试可以分为有源基站天线测

试和无源基站天线测试两大类,这两类测试针对的是基站天线的不同测试阶段和测试状态。平面波模拟器在有源和无源 5G 基站天线测试中均能发挥关键的作用。平面波模拟器有源基站天线测试链路如图 8 所示。图 8(a)为测试有源基站天线下行参数时的测试系统布局,而图 8(b)为在测试有源基站天线上行参数时使用的测试链路布局。对有源基站天线的测试是基站的天线辐射性能和射频组件性能的联合测试,测试的状态是基站天线整机的性能。而此类测试针对的是整机基站天线出厂前的检验和出厂后的认证、验收。测试的基站指标不仅包含天线方向图,还包含等效全向辐射功率(Effective Isotropic Radiated Power, EIRP)、等效全向灵敏度(Effective Isotropic Sensitive, EIS)、误差向量幅度(Error Vector Magnitude, EVM)和相邻频道泄漏比(Adjacent Channel Leak-

age Ratio, ACLR)等射频参数。

平面波模拟器无源基站天线测试链路如图 9 所示。在基站天线的研发生产过程中,基站天线仍可以引出测试端口,这将允许在基站天线每路通道上接入开关矩阵对基站天线的各路通道性能进行精确的测试评估。将开关矩阵与平面波模拟器配合使用后,可以同时测试基站天线各端口的反射系数、耦合系数、辐射幅度和相位信息。因此,平面波模拟器可以对基站天线进行精确的校准测试。

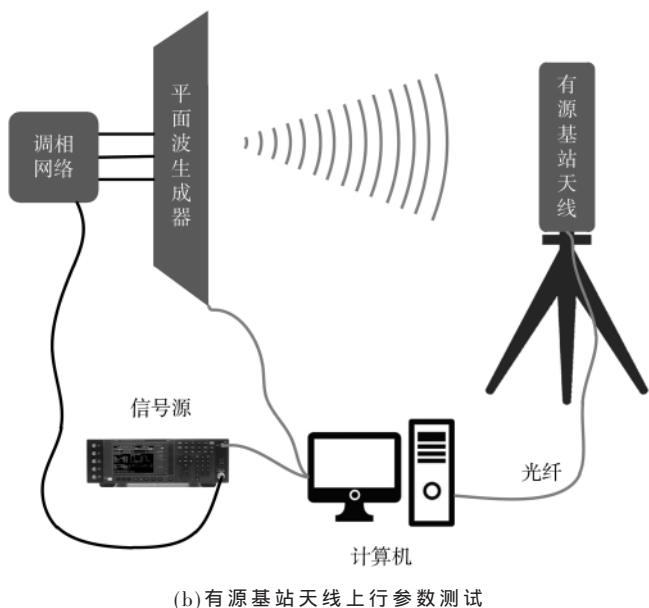
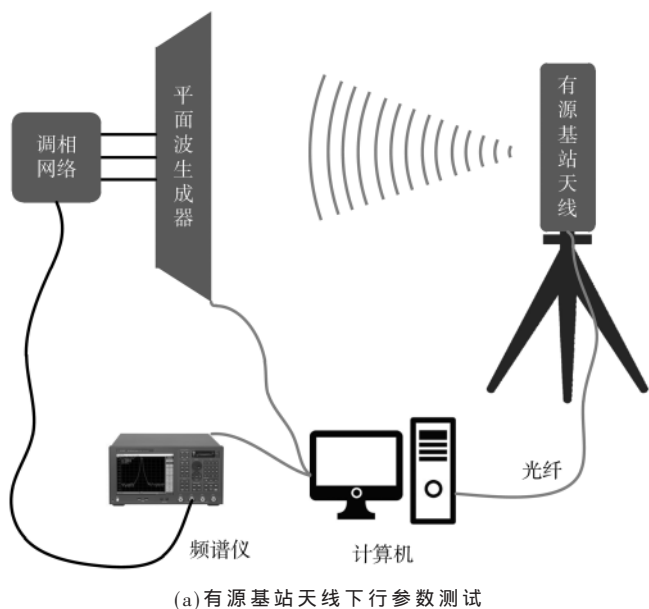
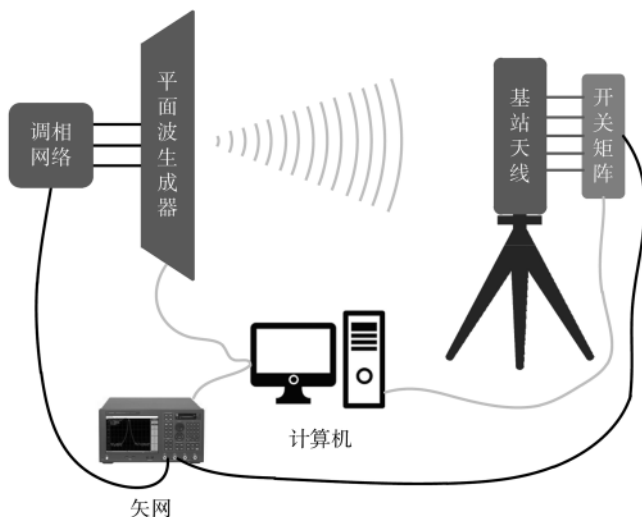


图 8 平面波模拟器有源基站天线测试链路



如图 7 所示的平面波模拟器北航 PWG-63 测试单台基站天线的时间小于 5 min,极大地提高了基站天线的测试效率。北航 PWG-63 在校准测试中无需预知基站内单元天线的位置,测试的柔性很高,并且在测试过程中并不需要多次的机械运动,测试过程方便快捷。

4 结论

5G 移动通信技术的快速发展极大地推动了相关设备测试技术的研发进程。本文对用于 5G 基站天线 OTA 测试的平面波模拟器进行了系统介绍,论述了平面波模拟器的发展史、设计方法、国内外成果和典型应用。平面波模拟器将为 5G 基站测试评估提供前所未有的新体验。

参考文献

- [1] SHAFI M, MOLISCH A F, SMITH P J, et al. 5G: a tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(6): 1201-1221.
- [2] LIU D, WANG L, CHEN Y, et al. User association in 5G networks: a survey and an outlook[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(2): 1018-1044.
- [3] IMT-2020(5G)推进组. 5G 愿景与需求[OL]. (2014-05-xx) [2020-06-13]. http://www.imt-2020.org.cn/zh/documents/1?currentPage=2&content=.

- [4] 魏克军.5G 商用发展面临的机遇与挑战[J].信息通信技术与政策,2019(10):60-63.
- [5] 陈亮,杨奇.5G 网络中无线频谱资源分配的进展分析[J].光通信研究,2016(6):68-71.
- [6] IMT-2020(5G)推进组.5G 概念白皮书[OL].(2015-02-xx)[2020-06-13].http://www.imt-2020.org.cn/zh/documents/1?currentPage=2&content=.
- [7] 尤力,高西奇.大规模 MIMO 无线通信关键技术[J].中兴通讯技术,2014,2(2):26-28.
- [8] MARTINEZ À O, NIELSEN J φ, 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.
- [9] YANG B, YU Z, DONG Y, et al. Compact tapered slot antenna array for 5G millimeter-wave massive MIMO systems[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 6721-6727.
- [10] 李勇,徐黎,李文.5G 基站天线 OTA 测试方法研究[J].移动通信,2018,42(6):7-10.
- [11] FAN W, CARTON I, KYOSTI P, et al. A step toward 5G in 2020: low-cost OTA performance evaluation of massive MIMO base stations[J].IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2017, 59(1): 38-47.
- [12] KONG H, WEN Z, JING Y, et al. Midfield over-the-air test: a new OTA RF performance test method for 5G massive MIMO devices[J].IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(7): 2873-2883.
- [13] 王正鹏,乔兆龙,苗俊刚.5G Massive MIMO 天线 OTA 测试方法探讨[J].电信技术,2017(11):1381-1385.
- [14] ZHANG X, ZHANG Z, MA Y. 5G antenna system OTA testing with plane wave generator in range-constrained anechoic chamber[C].2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation(APCAP), 2017: 1-3.
- [15] SCATTONE F, SEKULJICA D, GIACOMINI A, et al. Design of dual polarised wide band plane wave generator for direct far-field testing[C].13th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP), 2019: 1-4.
- [16] XIE R, WANG X, WANG R, et al. Synthesis of plane wave applied to 5G communication antenna measurement[C].2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium-Spring(PIERS), 2017: 195-198.
- [17] SUN X, WANG Z, MIAO J. Near field quasi plane wave generation and performance evaluation[C].2018 Asia-Pacific Microwave Conference(APMC), 2018: 917-919.
- [18] QIAO Z, WANG Z, MIAO J. A high channel consistency subarray of plane-wave generators for 5G base station OTA testing[J].Electronics, 2019, 8(10): 1-12.
- [19] HILL D A. Theory of near-field phased arrays for electromagnetic susceptibility testing[M].National Bureau of Standards, 1984.
- [20] HILL D A, KOEPKE G H. A near-field array of yagi-uda antennas for electromagnetic-susceptibility testing[J].IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1986, 28(4): 170-178.
- [21] COURTNEY C C, VOSS D E, HAUPT R, et al. The measured performance of a plane-wave generator prototype[C].2002 Antenna Measurement Techniques Association Conference(AMTA), 2002: 1-6.
- [22] HAUPT R. Generating a plane wave with a linear array of line sources[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(2): 273-278.
- [23] D'URSO M, PRISCO G, CICOLANI M. Synthesis of plane-wave generators via nonredundant sparse arrays[J].IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8: 449-452.
- [24] WANG H, MIAO J, JIANG J, et al. Generating plane waves in the near fields of pyramidal horn arrays[C].ISAPE, 2012: 211-218.
- [25] 王辉.天线近场区均匀平面波生成方法研究[D].北京:北京航空航天大学,2011.
- [26] BUCCI O M, MIGLIORE M D, PANARIELLO G, et al. Planewave generators: design guidelines, achievable performances and effective synthesis[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(4): 2005-2018.
- [27] 陈建安,郭大伟.遗传算法理论研究综述[J].西安电子科技大学学报,1998,25(3):363-368.
- [28] 全绍辉.紧缩场设计、检测与应用研究[D].北京:北京航空航天大学,2003.

(收稿日期:2020-06-13)

作者简介:

王正鹏(1981-),男,博士,教授,主要研究方向:可重构天线技术、紧缩场馈源技术、天线测量技术、超宽带天线技术等。

谢拥军(1968-),男,博士,教授,主要研究方向:天线与微波工程、计算电磁学及应用、电磁兼容、太赫兹技术等。

苗俊刚(1963-),男,博士,教授,主要研究方向:微波毫米波实时成像技术、微波遥感理论与技术、电磁散射与辐射测量技术等。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所