5G OTA 测量宽带平面波模拟器的高效优化方法与应用

朱诗瑶, 王正鹏, 乔兆龙, 张雨生, 孙雪蕾, 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:本文提出一种锥削函数同遗传算法相结合的阵面优化算法,该算法能够显著提高遗传 算法优化效率,解决宽带平面波模拟器的多个工作频段优化问题。基于该算法设计了两种不 同频段的宽带平面波模拟器,分别覆盖 0.7~2 GHz 和 2~6 GHz 频段。仿真结果显示,在 700 MHz 时,2.36m*2.36m(5.5 λ *5.5 λ)阵列口面可以形成 1m*0.5m*1m 高质量静区,该阵列 工作频率范围可以达到 0.7~2 GHz。 2~6 GHz 平面波模拟器的口面尺寸为 1.8m*1.8m,静 区尺寸可以达到 1m*1m*1m。本文最后给出了 2~6 GHz 平面波模拟器的应用实例。 关键词:宽带;平面波模拟器;静区;5G;空口测试 中图分类号:TN98 文献标识码:A

Design Theory and Application of Plane Wave Generator in

5G Mobile Communication OTA Measurement

ZHU Shiyao, WANG Zhengpeng, QIAO Zhaolong, ZHANG Yusheng, SUN Xuelei, XIE Yongjun, MIAO Jungang

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

Abstract: This paper proposes an optimization algorithm that combines the taper function with the genetic algorithm, which can significantly improve the optimization efficiency of the genetic algorithm and solve the optimization problem of the broadband plane wave generator with multiple working frequency bands. Two plane wave generators are developed based on the new optimization method with different frequency bands, covering 0.7~2 GHz and 2~6 GHz respectively. The simulation results indicate that a $2.36m*2.36m(5.5\lambda*5.5\lambda)$ array can form a 1m*0.5m*1m quiet zone at 700 MHz. The working frequency range of this array covers 0.7~2GHz. The size of the 2~6 GHz plane wave generator is 1.8m*1.8m with the size of the quiet zone reaching 1m*1m*1m. Finally, this paper gives an application example of 2~6 GHz plane wave generator.

Key words: broadband; plane wave generator; quiet zone; 5G; OTA

基金项目:国家科技重大专项(2018ZX03001028)

作者简介: 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。电子邮箱: jmiaobremen@buaa.edu.cn

1 引言

随着通信数据流量的指数增长,5G 移动通信的 基站、智能终端设备向高速率、大容量、低时延等 方向快速发展^[1-5]。5G 网络架构广泛应用大规模多 输入多输出(Massive MIMO)天线阵列,其基站天 线单元的数目相较 4G 基站有了明显的提高^[3]。与此 同时,随着设计和加工技术的进步,基站天线与后 端射频组件逐步趋于一体化集成,这种新架构意味 着天线和射频之间没有可连接仪器的测试端口,天 线和射频单元无法分开测试。因此,空口(OTA) 测试将逐步取代传导测试,承担大量的研发和产线 测试工作^[6-8]。

当前针对 5G 基站的 OTA 测试方法包括:室内 远场法、紧缩场法和多探头球面近场法等。远场法 一般认为具有最小的测量不确定度,但是受限于暗 室空间要求过高,5G 通信业内装备数量很少。紧缩 场同样面临所需暗室空间大和建设成本高的问题, 多探头球面近场等近场测试方法无法直接测量等效 全向辐射功率(EIRP)、误差矢量幅度(EVM)、等 效各向同性灵敏度(EIS)等射频指标。近年来一种被 称为平面波模拟器的新型 OTA 测试装置备受瞩目。 平面波模拟器通过天线阵列和幅相控制器在近场距 离处能够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^[9-10]。平面波模拟器尺寸紧凑、 成本较低、能够提供 5G 基站天线射频和业务信号 进行直接测量的远场环境。

20世纪后国内外许多学者针对平面波模拟器问题展开相关研究。2003年,学者 Randy Haupt 使用遗传算法仿真了线源阵列平面波模拟器,生成了幅度波动小于 2dB,相位波动小于 1°的平面波环境^[11]。 2009年,意大利学者 M. D'Urso 提出了平面波模拟器的稀疏阵列方法,节约了成本和仿真时间^[12]。 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^[13-14]。2013年,Ovidio Mario Bucci 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^[15-17]。

近年来,国内外针对超宽带平面波模拟器相关研究取得了一定进展^[18-20],但是还缺乏全面系统的研究。2019年,F. Scattone 提出基于全数字波束网络及子阵的可工作在 0.6~6GHz 频率范围内宽带双极化平面波模拟器,在距离模拟器口面 950 mm 处形成直径为 480 mm 的球形静区。但是该方法支持

的天线阵列的尺寸较小而且辐射元件数量较少,生成的静区过小^[21-23]。国内对超宽带平面波模拟器的设计方法及生成静区质量缺乏系统研究与介绍。值得注意的是,随着 5G 的 700M 频段授权广电使用,业界普遍关注平面波模拟器能否应用于 2GHz 以下频段。

本文针对 5G 测量技术的发展需求,针对平面 波模拟器设计理论、两种不同频段(0.7~2 GHz 和 2~6 GHz)的宽带平面波模拟器设计仿真及其典型应 用展开论述。

2 平面波模拟器设计理论

平面波模拟器由多个天线单元排列组成平面天 线阵列,通过优化幅相控制器网络的激励权值,并 对每路天线单元进行相应馈电,可使平面波模拟器 在近场距离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 天线阵平行放置。平面波模拟器的原理框图如图1 所示。



2.1 改进遗传算法优化设计平面波模拟器

传统的遗传算法在待优化样本数量很大的情况 下,效率低下,难以获得较好的优化结果。本文基 于平面波模拟器的工作原理,在传统遗传算法基础 上对初始种群进行调整,提出了锥削函数与遗传算 法相结合的优化方法。该方法在初始条件下将解限 制在相对小的可调控区间内,极大程度提高了优化 效率。

均匀分布矩形口径天线在近场形成准平面波需 要对边缘截断进行处理,在边缘处理技术中,连续 锥削函数能极大地减小边缘绕射作用,其口面场分 布函数为:

$$f(R) = \left[1 + (\alpha R)^{\beta}\right]^{\gamma} \tag{1}$$

而本文所设计的平面波模拟器天线单元可视为 矩形口径天线的离散化,因而引入了归一化孔径场 分布函数,该函数在中心区平坦,在边缘区锥形下 降,用以合成近场中的理想平面波。公式可描述如 下:

$$f = \left[1 + \left(\alpha \frac{|x|}{A}\right)^{\beta}\right]^{\gamma} \bullet \left[1 + \left(\alpha \frac{|y|}{A}\right)^{\beta}\right]^{\gamma}$$
(2)

其中 *A* 等于口面边长的一半, *α*, *β*, γ是三个可 调参数。通过优化*α*, *β*, γ的值,可以分别计算出激 励幅度的适当分布,并对其进行范围在(0.99,1.00) 内的随机扰动,以此作为初始种群。

本文选取的目标函数为幅度峰峰值和相位峰峰 值的加权和函数,因期望得到目标函数的最小值, 以目标函数倒数作为优化算法的适应度函数。

对解空间的每个解依据所选取的适应度函数采 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。最后设置一个最大的迭代次数,超过 该迭代次数即终止进程^[24]。

通过以上操作不断迭代,最终仿真出理想的平 面波环境并计算得到平面波模拟器各天线单元的激 励权值。

2.2 平面波质量评估指标

为评估平面波模拟器生成的场近似平面波的程度,引入了几种评估参数,包括表示场中最大和最小幅度之间的差异的幅度偏差,表示场中最大和最小相位之间的差异的相位偏差。此外,还引用了关于幅度和相位的评价参数^[25]:

$$\varepsilon_a = \frac{a_{\max}}{a_{\min}} \tag{3}$$

$$\varepsilon_{p} = \frac{2\pi - \left|\delta_{\max} - \delta_{\min}\right|}{2\pi} \tag{4}$$

其中 a_{mx} 和 a_{min} 分别表示观察区域电场最大和 最小振幅值; δ_{mx} 和 δ_{min} 分别表示观察区域电场最大 和最小相位值。显然,理想平面波状态下 $\varepsilon_a = \varepsilon_p = 1$ 。 在工程应用中,为了获得可接受的测量不确定 度,一般静区的幅度和相位偏差应位于±1dB和± 10°之间。由式和式可计算得, ε_a 应小于 1.122, ε_p 应大于 0.972,并以此范围作为后续评估平面波质量 优劣的依据。

3 宽带平面波模拟器设计仿真

3.1 0.7~2 GHz 宽带平面波模拟器设计仿真

随着 5G 的黄金频段 700MHz 频段最终落地, 业界普遍关心平面波模拟器能否应用在 700MHz。 为了降低制造成本,700MHz 的平面波模拟器电尺 寸往往小于 10 个波长,在设计难度上显著加大。本 文设计了工作在 700MHz 频率下具有 12*12 个天线 单元,以 0.5λ为间隔等间距排列的二维平面波模拟 器,其口面尺寸为 2.36m*2.36m (5.5λ*5.5λ)。观测 的静区位置距阵面 2 米,观察区域为 1m*0.5m 的矩 形区域。

应用 2.1 节介绍的锥削函数与遗传算法相结合的方法进行优化。选择在α=1, β=3, γ=-2 参数下的孔径场分布函数作为基准初始种群,该分布如图 2 所示呈中心对称,且幅度衰减自内向外逐渐增大。 该初始种群得到的幅相分布如图 3 所示,其中幅度 偏差在 1.3dB 之下,相位偏差在 3.5°之下。





图 3 初始种群 700MHz 下 2m 处静区电场幅度分布(上)和 相位分布(下)

在锥削函数的基础上利用遗传算法优化后的平面波模拟器能够实现在观察距离 2m 处大小为 1m*0.5m 观察面内电场幅度偏差小于 0.12dB,相位 偏差小于 1°的准平面波。其中优化后的静区电场分 布如图 4 所示。相较于初始种群,优化后系统性能成倍提升。



图 4 700MHz 下 2m 处静区电场幅度分布(上)和相位分布 (下)

图 5 分别展示了水平和垂直 4m 区域内近场幅 相分布规律,红色虚线框标明了水平方向 1m 和垂 直方向 0.5m 的静区范围。



图 5 近场区域内幅相水平分布(上)和垂直(下)分布 最终优化的阵列单元幅度和相位分布如图 6 所

示。



图 6 700 MHz 下阵列各天线单元幅度(上)和相位(下)配 置

应用图 6 所示幅相加权配置结果,平面波模拟 器不同纵向观察距离下的幅相评价指标变化如图 7 所示。图 7 表明在距离阵面 1.7m~2.7m 处共 1m 的 静区范围内幅度波动小于 1.2dB,相位波动小于 5.5°。



图 7 不同纵向观察距离下的幅相偏差

在上述结果下,利用相同优化方法分别计算了 工作频率在 960MHz、1.7GHz 和 2GHz 的平面波模 拟器幅相加权,得到相应的幅相偏差、评价指标结 果及静区尺寸。

由表 1 所知,前述所设计的 2.36m*2.36m 大小 的平面波模拟器工作频率覆盖了 700MHz~2GHz。 且工作在 2GHz 频率下的平面波模拟器可实现在中 心静区处幅相偏差分别在 0.4dB 和 9°之内的准平面 波,如图 8 所示。在 2GHz 频率下,静区尺寸可以

扩展到 1m*1m*1m。



E作频率/Hz	观察距离/m	幅度偏差/dB	相位偏差/°	\mathcal{E}_{a}	\mathcal{E}_p	静区规模
700M	1.7	1.1846	5.2878	1.1461	0.9853	- 宽*高*纵深 - 1.0m*0.5m*1.0n
	2.0	0.1184	0.9860	1.0137	0.9973	
	2.7	1.0863	5.3565	1.1332	0.9851	
960M	1.7	1.0841	8.9725	1.1329	0.9751	- 宽*高*纵深 - 1.0m*0.5m*1.0n
	2.0	0.2943	1.9439	1.0345	0.9946	
	2.7	0.8820	10.1774	1.1069	0.9717	
1.7G	1.8	0.9572	6.9393	1.1165	0.9807	- 宽*高*纵深 - 1.0m*0.5m*1.0n
	2.0	0.6575	2.8388	1.0786	0.9921	
	2.8	1.1195	7.8709	1.1376	0.9781	
2G	2.9	1.1647	5.4634	1.1435	0.9848	- 宽*高*纵深 - 1.0m*1.0m*1.0n
	3.2	0.3141	8.4360	1.0368	0.9766	
	3.9	1.0679	10.9700	1.1308	0.9695	

图 8 2GHz 下 3.2m 处静区电场幅度分布(左)和相位分布(右)

法和仿真结果。平面波模拟器阵面一般采用等间 隔布局, 若应用干招宽带条件下, 高频段静区性 能受单元布局稀疏影响,往往有比较大的幅度和 相位波动,因而引入了非均匀阵列设计,提高平 面波模拟器的高频性能。

本文设计了由 16*16 个阵元等幅同相馈电的 平面波生成器, 阵列口面为 28λ*28λ, λ为 4.9GHz 对应的波长。阵元位置限制了两项条件: 1、线阵 阵元位置分布关于中心对称: 2、线阵两侧阵元位 置固定(限制线阵长度)。观测的静区位置位于阵 面前方2米处,观察区域为直径为1米的圆形区 域。非均匀阵的位置排列采用了图9所示的密度 锥削阵的方法,其中d。为中心单元和紧邻单元的 间距, d_{k-1}为第 k 个单元和第 k-1 个单元的间距。



图9 密度锥削阵示意图

均匀阵列和非均匀阵列在 4.9GHz 2m 处静区 电场分布分别如图 10、图 11 所示。由图 10 和图 11 对比可知,采用非均匀阵排列后静区幅度波动 峰峰值由 2.5dB 之上减小到了 1.8dB 以下,而相位 波动峰峰值由 16°之上减小到了 10°以下。非均匀 阵列排布方式使得静区的平坦性有了较大的提高。



图 10 均匀阵列 4.9GHz 2m 处静区电场幅度分布(上)和



-0.6

-0.8

-1.2

-1.4

-1.6

0.5

0.4 0.3

0.2

0.1

y/m

-0.1

-0.2

-0.3

-0.4

0.5

0.4



图 11 非均匀阵列 4.9GHz 2m 处静区电场幅度分布(上) 和相位分布(下)

非均匀阵列在 2.6GHz 和 3.5GHz 两处频率 下 2m 处静区电场分布分别如图 12、图 13 所示。 在中、低频段的静区电场分布幅度波动峰峰值均 小于 2.5dB, 相位波动峰峰值均小于 13°。



图 12 非均匀阵列 2.6GHz 2m 处静区电场幅度分布(上)



图 13 非均匀阵列 3.5GHz 2m 处静区电场幅度分布(上) 和相位分布(下)

4 宽带平面波模拟器应用

一款工作在 2~6GHz 的宽带平面波模拟器测 试现场如图 14 所示,该款平面波模拟器由 16*16 个单元天线组成平面波生成器阵面,单元间距呈 现非均匀线阵排布。我国 Sub-6GHz 的 5G 基站天 线都可以在此测量系统中进行测试。



图 14 宽带平面波模拟器测试现场

该型宽带平面波波模拟器已经在相关基站测 试评估机构对多家厂商的5G基站天线设备进行了 测试验证。测试的指标包括天线方向图、EIRP、 EIS、EVM 和相邻频道泄漏比(Adjacent Channel Leakage Ratio, ACLR)等射频参数。

基站的测试种类包含有源基站测试和无源基

站测试两大类,分别针对的是不含射频测试端口 和含有射频测试端口的 Sub-6GHz 基站。而宽带平 面波模拟器的应用也能够满足 5G 基站研发、出厂 前的检验和出厂后的认证、验收等多种应用场景 的需求。

5 结论

5G 移动通信技术的快速发展极大地推动了 OTA 测试技术的发展。本文对新型 OTA 测试中的 平面波模拟器及其研究进展,设计理论进行了系 统介绍。对超宽带平面波模拟器设计理论和方法 进行了论述,提出两种不同频段的宽带平面波模 拟器,分别覆盖 0.7GHz~2GHz 和 2GHz~6GHz。

本文提出的电小尺寸超宽带平面波模拟器设 计方法为今后 5G 基站 OTA 测量提供借鉴。

参考文献

- [1] 蒋政波,郭翀,洪伟.5G 毫米波测试方法研究进展[J].中 国科学基金,2020,34(02):126-132.
- [2] X. Zhang, Z. Zhang and Y. Ma, "5g Antenna system OTA testing with plane wave generator in range-constrained anechoic chamber," 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Xi'an, 2017, pp. 1-3.
- [3] 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.
- [4] 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, V66 (12): 7206-7215.
- [5] 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, V65 (12): 6721-6727.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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, V59 (1): 38-47.
- [9] 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, V67 (7): 2873-2883.

- [10] 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.
- [11] Haupt R..Generating a Plane Wave with a Linear Array of Line Sources[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, V51(2): 273-278.
- [12] D'Urso M., Prisco G., Cicolani M.. Synthesis of Plane-Wave Generators via Nonredundant Sparse Arrays[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, V8: 449-452.
- [13] Wang H, Miao J., Jiang J.. Generating Plane Waves in the Near Fields of Pyramidal Horn Arrays [A]. ISAPE[C], 2012,211-218.
- [14] 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.
- [15] M. Bucci, M. D. Migliore, G. Panariello and D. Pinchera, "On the synthesis of plane wave generators: Performance limits, design paradigms and effective algorithms," 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Prague, 2012, pp. 3500-3503.
- [16] M. Bucci, M. D. Migliore, G. Panariello and D. Pinchera, "An effective algorithm for the synthesis of a plane wave generator for linear array testing," Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, Chicago, IL, 2012, pp. 1-2.
- [17] 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, V61(4): 2005-2018.
- [18] 北京航空航天大学.一种适用于近场平面波模拟器的宽带双极化低散射探头及阵列[P].中国专利.实用新型. CN201811339432.X, 2018-11-12
- [19] Qiao Z., Wang Z., Loh T., et al. A Compact Minimally Invasive Antenna for OTA Testing[J].IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, V18(7): 1381-1385
- [20] 冯学勇,杨林,龚书喜等.可用于基站天线测量的平面波产生器的设计[J].西安电子科技大学学报,2015,03:33-37.
- [21] F. Scattone et al., "Dual Polarized Plane Wave

Generator Design for Direct Far-Field Testing," 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, Atlanta, GA, USA, 2019, pp. 1841-1842.

- [22] F. Scattone et al., "Design of Dual Polarised Wide Band Plane Wave Generator for Direct Far-Field Testing,"
 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Krakow, Poland, 2019, pp. 1-4.
- [23] F. Scattone et al., "Comparative Testing of Devices in a Spherical Near Field System and Plane Wave Generator," 2019 Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA), San Diego, CA, USA, 2019, pp. 1-3.
- [24] Yan Li,Bo Yu,Xiaodong Li,Shijun Luo,Haibo Li. Application and Realization of Genetic Algorithm Based on MATLAB Environment[M].Springer International Publishing:2019-04-25.
- [25] X. Sun, Z. Wang and J. Miao, "Near Field Quasi Plane Wave Generation and Performance Evaluation," 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Kyoto, 2018, pp. 917-919.