



有源天线测试方法研究和应用^{*}

杨峰义, 杨 涛, 谢伟良

(中国电信股份有限公司技术创新中心 北京 100031)

摘 要: 有源天线实现了基站射频模块和天线振子的紧密结合, 这种结构带来了设备性能指标测量的困难。在研究传导测试、耦合测试和远场 OTA 测试等有源天线测试方法的基础上, 针对传导测试和远场 OTA 测试结合的混合方法, 研究了有源天线射频指标和天线方向图特性的测试方法并进行了测试验证, 为业界后续有源天线性能指标的测试方法研究提供参考。

关键词: 有源天线; 传导测试; 耦合测试; 远场 OTA 测试

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.02.014

Study and Application on Test Methodology of Active Antenna System

Yang Fengyi, Yang Tao, Xie Weiliang

(Technology Innovation Center, China Telecom Co., Ltd., Beijing 100031, China)

Abstract: Active antenna system realizes the tight coupling of RF modules and antenna dipoles for the base stations, which makes it difficult to measure AAS RF performance. On the basis of study on several AAS test methodologies such as conducted test, coupling test and far field over-the-air test, AAS RF performance and antenna patterns was tested via combining the conducted test and far field over-the-air test, and the feasibility of combined test methodology was validated, and the reference for the future research on AAS testing was provided.

Key words: AAS, conducted test, coupling test, far field over-the-air test

1 引言

移动通信系统中的有源天线是将传统基站的射频部分与天线集成设计为一个整体, 其典型结构是采用多通道的射频单元和天线振子配合, 在完成射频信号收发时可以实现空间波束成形。有源天线实现了传统基站有源模块与天线的紧密结合, 模糊了传统天线与基站的功能划分。这种紧耦合结构和工作原理决定了对有源天线的测试不能照搬已有的基站有源模块的测试方法和无源天线的测试方法, 需要针对有源天线具有的单一测试界面、独特

空间波束成形功能的特殊需求, 研究和制定出一套科学、合理和高效的测试方法。

目前, 3GPP 国际标准组织已经针对有源天线立项, 进行有源天线的架构、功能、指标和测试方法等标准讨论与制定工作^[1-4], 目前提出了很多不同的观点和方法, 如传导测试(conducted test)、耦合测试(coupling test)、远场 OTA (over the air) 测试等, 每种方法都有其优点和缺点, 目前尚未找到一种各方均认可的标准方法, 这也是 3GPP 下一步在有源天线领域的工作重点。

有源天线的测试主要包括射频指标测试、天线方向图

^{*} 国家科技重大专项“新一代宽带无线移动通信网”基金资助项目(No. 2013ZX03001018)



测试、空间波束成形(如上下行链路不同倾角、垂直波束分裂、水平波束分裂、不同频段波束控制、不同制式波束控制等)的功能和性能测试。其中,射频指标和天线方向图测试主要在实验室中进行,空间波束成形功能和性能测试则需要在实际网络场景中进行组网技术性能测试与验证工作。本文首先给出了有源天线的典型系统架构,然后讨论了其典型的测试方法,最后给出了混合测试的具体方法与测试验证结果。

2 有源天线的系统架构

典型的有源天线的系统架构如图 1 所示^[1],主要由 3 部分组成:收发单元阵列(transceiver unit array, TXRUA)、无线分布网络(radio distribution network, RDN)和天线阵列(antenna array, AA)。TXRUA 包含多组发射单元(transmitter unit, TXU)和接收单元(receiver unit, RXU)。发射单元从基站获得基带输入并提供射频发送输出,射频发送输出将通过无线分布网络分配到天线阵列,接收单元执行与发射单元相反的工作。无线分布网络将输出信号分配到相应天线路径和天线单元,并将天线的输入信号分配到相反的方向。收发单元和无源天线阵列之间可以是一对一的映射关系,也可以是一对多的映射关系,具体情况依赖于产品实现。天线阵列可包括各种实现和配置,如极化、空间分离等。

3 有源天线的测试方法研究

如前所述,3GPP 在 TR 37.840 中提出和讨论了多种测试方法^[1],总结起来主要有传导测试、耦合测试、远场 OTA 测试、混合测试(combined test)、瑞利多径衰落 OTA 测试(Rayleigh faded multi-path over-the-air test)、近场探头扫描测试(near-field probe scanner test)等,本节重点讨论

这几种测试方法的原理、适用性及局限性。

3.1 传导测试

传导测试借鉴了传统基站射频测试的方式,通过射频电缆将被测设备与测试仪表连接起来。可以对单个收发单元进行测试,也可以通过合路器将多个收发单元合路后进行测试。如图 2 所示,传导测试的参考界面定义在天线振子和有源收发单元部分之间,这种测试方法要求产品实现时预留出专门的测试接口或者测试时需要将有源收发单元与无源天线振子断开。传导测试由于使用射频线缆连接,不受外界环境干扰,可以定量、重复测试,可以利用传统基站的测试仪表、测试方法和测试设备,适合于 AAS 有源部分的射频指标测试。但是,传导测试已将天线振子排除在外,无法直接测量出收发单元阵列和天线阵列组合后的空间性能,对空间性能特征的描述具有局限性。另外,传导测试是将 AAS 有源部分和无源部分割裂开来,需要二者之间有明确的物理接口,因此适合作为产品研发的中间过程测试,而不适合作为最终完整商用产品的入网认证测试,除非在产品实现时已预留出专门的测试接口。

3.2 耦合测试

如图 3 所示,耦合测试是近场测试,测试装置内安装了一组场强探针阵列,探针阵列和有源天线辐射振子互相平行,同时还包括一个无源射频分路器/合路器,分路器/合路器传导射频信号到各个探针端口,也从各个探针端口整合射频信号到测试仪器。测量装置中的探针数量不一定和有源天线的辐射振子数量相同。这种方法为测试有源天线的接收和发射提供了一个单一的连接点,避免需要直接连接到有源天线的收发单元接口,但需要设计一个定制的无源耦合装置,而且要求该测试装置必须非常精确地平行对准有源天线的壳,以保证测量的精确性和可重复性。耦合测试装置需要支持标准定义的整个频率范围(9 kHz~12.75 GHz),近

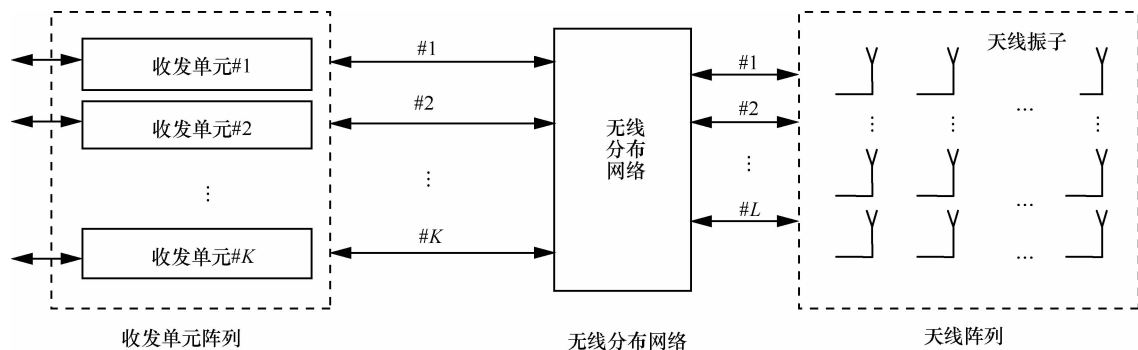


图 1 有源天线的系统架构示意

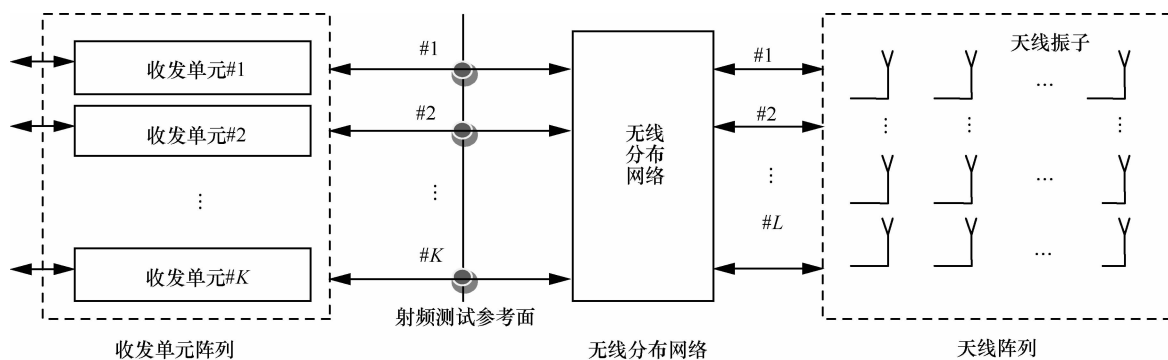


图 2 传导测试的测试参考面

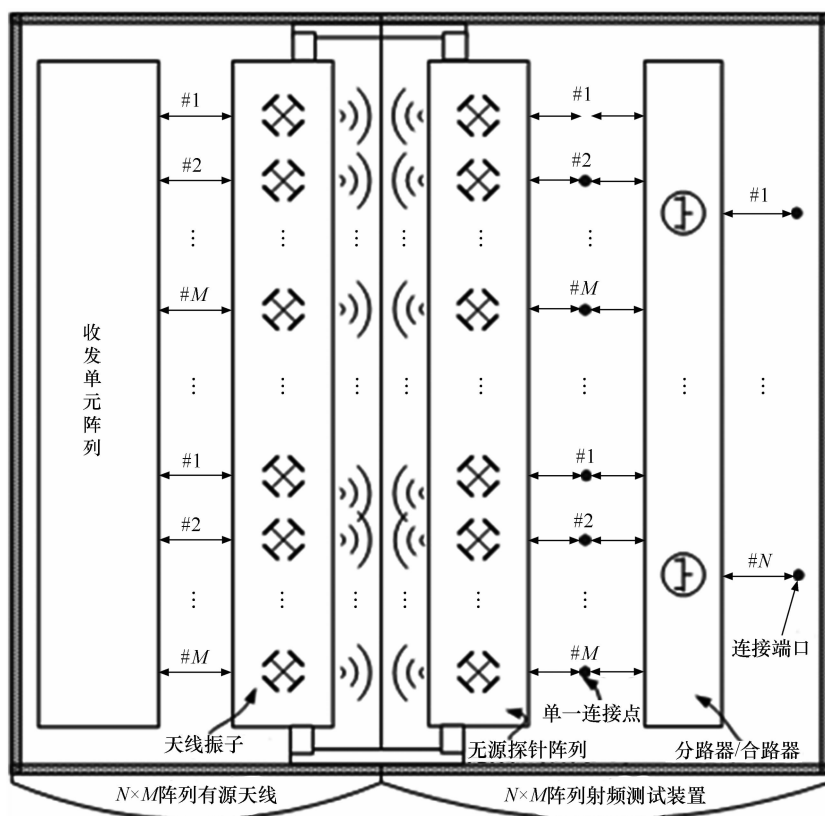


图 3 耦合测试装置示意

场探头的电气特性在整个频段应该非常精确,探针响应的
影响可以从测试结果中去除。耦合测试方案的主要工作是
开发测试装置。

3.3 远场 OTA 测试

远场 OTA 测试借鉴传统无源天线的测试方法,在室
内远场或室外远场通过空间场测量的方法进行有源天线
系统的辐射、抗干扰性能测试。OTA 测试提供了测量有源
天线系统完整的远场空间特性的可能。为了获得可重复性
和稳定的结果并避免对有源天线系统特性测量的干扰,测

试时应应对测试系统和测试仪表进行严格校准。远场 OTA
测试更适合天线方向图和空间特性测量,不适合有源天线
射频指标的测试,因为很多射频测试是在低电平下进行
的,需要测试环境具有很好的屏蔽性,不会受到外界信号
的干扰,另外还需要非常严格的路径损耗测量和校准,因
此,远场 OTA 测试的准确性、测试效率和测试成本等都需
要进行进一步研究和评估。

3.4 混合测试

混合测试是综合考虑前面提到的测试方法的适应性、



局限性、测试效率和测试准确性等因素,将不同的测试方法相结合,从而对有源天线系统进行全面的测试。目前主要有两种组合方式。

- 传导测试和远场 OTA 测试相结合: 首先使用 OTA 测试进行天线空间特性的测试,如方向图、有效全向辐射功率 (effective isotropic radiated power, EIRP)、有效全向接收灵敏度 (effective isotropic received sensitivity, EIRS) 等,然后使用传导测试进行有源部分的射频指标测试。
- 耦合测试与远场 OTA 测试相结合: 首先使用 OTA 测试进行天线空间特性的测试,如方向图、EIRP、EIRS 等,然后使用近场耦合测试进行有源部分的射频指标测试。

3.5 瑞利多径衰落 OTA 测试

如图 4 所示,瑞利多径衰落 OTA 测试需要在混响室中进行,在混响室里,搅模棒和金属反射壁产生瑞利衰落的环境。如果测量时间足够长,被测天线则接收信号的能量是各向均匀的。瑞利多径衰落 OTA 测试给出了一种总全向辐射功率和总全向接收灵敏度的测量方法。

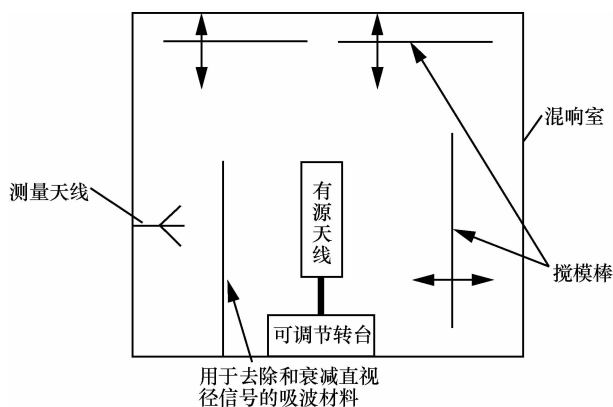


图 4 瑞利多径衰落 OTA 测试示意

3.6 近场探头扫描测试

近场探头扫描测试方法近年来在无源天线测试中应用得越来越多,利用探头在天线口面上做扫描运动,测量天线口面上的幅度和相位,然后经近场到远场的变换,由计算机得到天线的远场特性,只要保证一定的幅度和相位测量精度,即可较为准确地得到远场特性。由于近场测量只需测量天线口面上的场,可以避免远场测量的诸多缺点,具有测试精度高、安全保密、全天候工作等优点,并且能很好地模拟和控制各种电磁环境,并通过软件有效地补偿各种测量误差。近场测量的精确度是

由射频反射、机械误差、截断误差和系统误差等因素决定的。为了尽可能减少反射和射频干扰,近场屏蔽室里都装有吸波材料。

现有的近场多探头扫描测试系统是针对无源天线设计的,考虑到天线收发信号的互易性,通常只测试一个传输方向,如何对现有的测试系统改造以适应有源天线的特殊需求,例如,区别于无源天线,有源天线上行和下行波束设置不同倾角,测试系统应该支持对上行和下行两个传输方向的测试,这些都还需要进一步研究。

4 混合测试方法的应用与测试结果

通过前面章节对各种测试方法的分析可知,每种有源天线测试方案各有利弊,混合测试方法综合考虑不同测试方法的适应性、局限性、测试效率和测试准确性等因素,充分利用各种测试方案的优点,将不同的测试方法相结合,从而对有源天线系统进行全面的测试,是目前接受度较高的测试方案。传导测试和远场 OTA 测试相结合的混合测试方法首先使用 OTA 测试方法进行天线空间特性(如方向图)的测试,然后使用传导测试方法进行有源部分的射频指标测试。本节重点讨论传导测试和远场 OTA 测试相结合的混合测试方式,并通过搭建实际的测试环境,对有源天线混合测试方案进行验证。

4.1 测试环境和配置

OTA 测试场采用室外远场环境,如图 5 所示。测试设备分置在两座楼顶之间,两楼间距 50 m 以上,满足远场测试条件;楼顶 1 上安装有测试转台,上面安装被测天线,可以通过控制电机实现匀速转动;楼顶 2 上有一个可以转动的天线支架,放置喇叭天线,可以通过控制电机旋转连接频谱分析仪或信号源设备,实现信号的接收或发射。

传导测试在实验室内进行,如图 6 所示。通过射频电缆将被测 AAS 与测试仪表连接起来,测试时需要将射频收发单元与天线振子断开,每个阵列的 4 个射频收发单元通过合路器合并到一路,作为一个端口连接到仪表,当然,也可以对单个收发单元的射频指标进行测试。需要注意的是,测试前需要对整个测试系统进行校准,利用有源天线的校准端口,分别调整连接到合路器的每一路信号,以确保 4 路信号在合路器处为等幅同相输入,经合路后的输出为基站的最大发射功率。

4.2 测试内容

测试方案的验证主要包括以下内容。

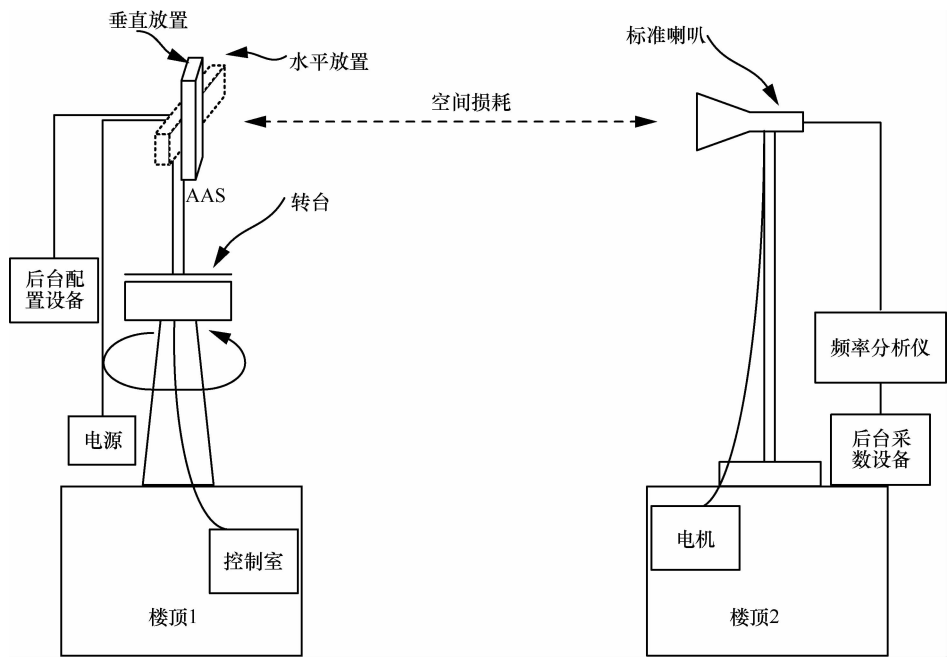


图 5 远场 OTA 测试连接

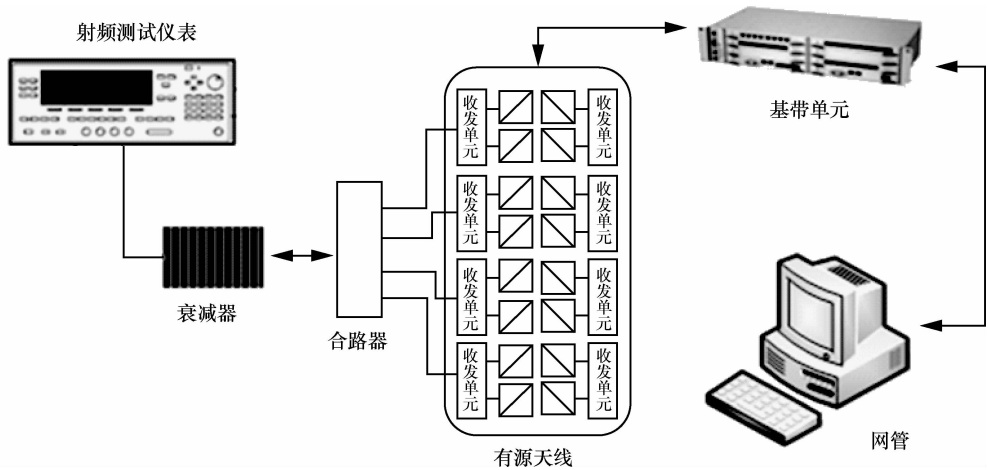


图 6 射频指标传导测试连接

- 射频指标测试: 参照 3GPP TS36.104^[2]中关于发射机和接收机的无线指标规定进行测试,如邻道抑制比 (ACLR)、信道内选择性 (ICS)、邻道选择性 (ACS)、阻塞要求等。所有射频指标测试使用传导测试方法。
- 天线方向图测试: 与无源天线方向图测试不同的是,有源天线方向图测试分为发射方向图和接收方向图,二者的信号传输方向不同,要求 AAS 软件能够发射指定的测试信号或者收集接收信号的功率电平。参照无源天线的指标要求,主要有水平面半功率波束宽度、垂直面半功率波束宽度、前后比、交叉极化比、下倾角精度、上旁瓣抑制等。通

过对垂直面方向图的测试可以验证有源天线独立上/下行倾角、垂直多扇区、载波独立下倾角等空间波束成形功能。所有天线方向图测试使用远场 OTA 测试方法。

4.3 测试过程和测试结果

4.3.1 射频指标测试结果

传导测试方法使得 AAS 射频指标测试与传统基站相似,可以对 3GPP 规范中的发射机和接收机无线指标进行测试,在此以发射机邻道抑制比 (ACLR) 和接收机信道内选择性 (ICS) 为例,给出具体的测试结果见表 1 和表 2。

通过分析以上的测试过程验证了有源天线混合测试方法可以获得有源天线设备的射频指标,传导测试方法能



表 1 发射机邻道抑制比测试结果

带宽/MHz	天线端口	频点/MHz	与最低载频和最高载频相邻信道中心频点偏移量/MHz	ACLR 规范要求	ACLR 测试结果		测试结论
					低端/dB	高端/dB	
20	端口 1(+45°极化)	2 630	BW_{channel}	<-45 dB	-62.5	-59.66	通过
			$2 \times BW_{\text{channel}}$		-64.22	-62.41	
		2 655	BW_{channel}		-60.59	-59.82	
			$2 \times BW_{\text{channel}}$		-63.05	-63.03	
		2 680	BW_{channel}		-55.95	-59.45	
			$2 \times BW_{\text{channel}}$		-61.59	-63.75	
	端口 2(-45°极化)	2 630	BW_{channel}		-61.56	-58.37	通过
			$2 \times BW_{\text{channel}}$		-64.3	-62.39	
		2 655	BW_{channel}		-60.57	-60.77	
			$2 \times BW_{\text{channel}}$		-62.79	-63.05	
		2 680	BW_{channel}		-58.24	-61.01	
			$2 \times BW_{\text{channel}}$		-61.72	-63.7	

表 2 接收机信道内选择性测试结果

带宽/MHz	天线端口	频点/MHz	期望信号平均功率/dBm (Prefsens + 6 dB)	干扰信号平均功率/dBm	干扰信号频点/MHz	测试结果/dBm	测试结论
20	端口 1(+45°极化)	2 510	-98.5	>-77	2 510	-51.1	通过
		2 535			2 535	-50.1	通过
		2 560			2 560	-49.4	通过
	端口 2(-45°极化)	2 510			2 510	-47.8	通过
		2 535			2 535	-48.4	通过
		2 560			2 560	-48.3	通过

够利用现有的测试设备、测试方法和测试规范,满足有源天线技术指标的测试要求。

4.3.2 天线方向图测试结果

参考传统无源天线的远场测试方法,搭建如图 5 所示的测试环境。对于发射方向图测试,通过后台配置设备,设定被测天线额定功率输出,调整标准喇叭在最大电平方向接收到相关信号,通过后台数据采集设备将频谱分析仪相关频点的功率大小记录。将 AAS 垂直或者水平放置,AAS 发射下行信号,通过转台的水平转动,可以分别测试水平或垂直方向图特性。接收方向图测试方法和发射方向图测试相似,区别在于喇叭天线端发送被测频点的信号,AAS 通过测试软件可以自动计算获得接收电平。AAS 在测试转台上进行方位旋转,并把接收到的电平作为角度的函数记录下来,从而可以得到接收方向

图的各项指标。

图 7 和图 8 为 AAS 同频双波束垂直面方向图和水平面方向图测试结果,由测试结果分析可知,无论是上行(频点 2 500 MHz)还是下行(频点 2 620 MHz),AAS 实现了垂直多扇区的功能,上行垂直方向波束 1 和波束 2,下倾角分别为 0°和 10°,下行垂直方向波束 1 和波束 2 的下倾角分别为 4°和 12°,同时也实现了上下行独立倾角的功能。测试结果也表明,混合测试方法可以满足有源天线波束方向图指标的测试要求。

5 结束语

有源天线的测试方法是 3GPP 研究和讨论的重点之一,提出了多种测试方法,每种方法都有各自的优点和缺点,适应于不同的测试内容和场景,到目前为止,尚没有哪

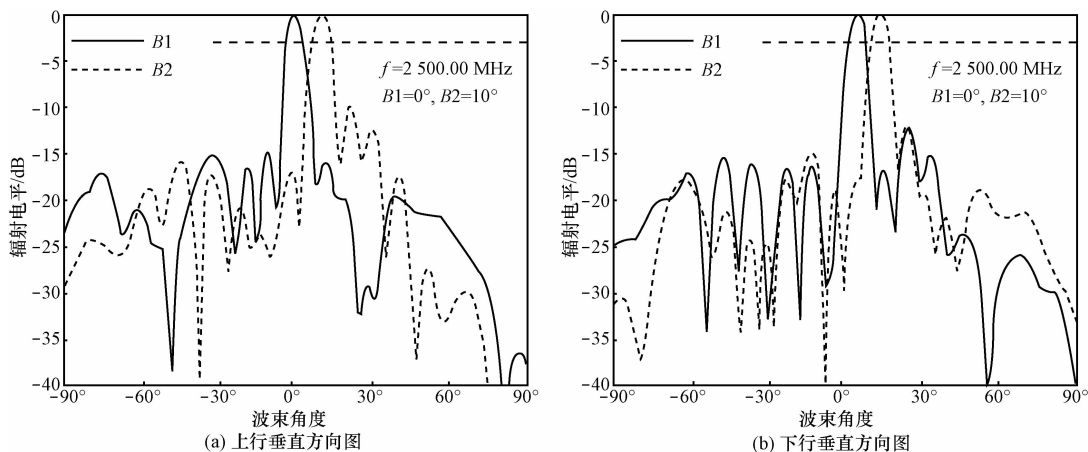


图 7 AAS 上行(或下行)同频双波束垂直面方向图

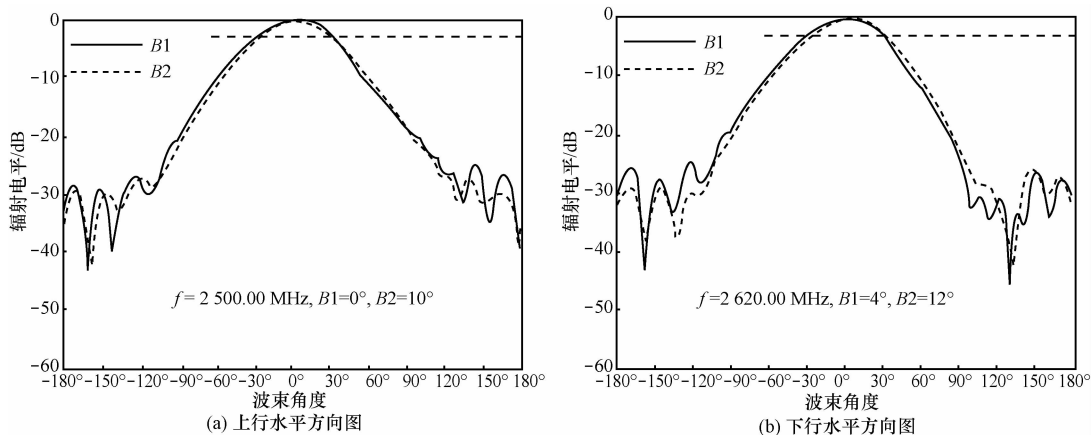


图 8 AAS 上行(或下行)同频双波束水平面方向图

一种方法能够得到业界的一致同意作为 AAS 唯一的标准测试方法。混合测试是综合考虑各种测试方法的优势和适应性,将不同的测试方法相结合,从而对有源天线系统进行全面的测试。本文利用传导测试与 OTA 测试组合的混合测试方法分别对 AAS 射频指标和天线方向图进行测试,测试过程和测试结果验证了混合测试方法的有效性和可行性,希望能为后续有源天线测试的相关研究提供参考。

参考文献

- 1 3GPP TR 37.840 R12. Study of AAS Base Station, 2013
- 2 3GPP TS 36.104 R10. E-UTRA Base Station (BS) Radio Transmission and Reception, 2013
- 3 3GPP TS 36.141 R10. Base Station Conformance Testing, 2013
- 4 3GPP TS 36.211 R10. E-UTRA Physical Channels and Modulation, 2013
- 5 杨涛,谢伟良,朱雪田. 有源天线在移动通信系统中的应用研究. 中国通信学会信息通信网络技术委员会 2011 年会论文集, 郑州, 中国, 2011: 702~707

- 6 乐铁军,朱海冰,袁飞. 有源阵列天线的发展及应用. 电子信息对抗技术, 2007, 22(4): 22~27

[作者简介]



杨峰义,男,中国电信股份有限公司技术创新中心副主任、教授级高级工程师、国家科技重大专项“新一代宽带无线移动通信网”总体组专家、中国通信标准化协会无线技术委员会副主席、中国通信学会无线与移动通信委员会委员,长期工作在移动通信领域,数次获得国家和省部级科技进步奖,发表学术论文数 10 篇,学术专著 6 部,译著 1 部。

杨涛,男,中国电信股份有限公司技术创新中心工程师,主要研究方向为移动通信天线规范与测试。

谢伟良,男,博士,中国电信股份有限公司技术创新中心高级工程师,主要研究方向为移动通信标准及测试。

(收稿日期:2013-09-12)