



从测试角度透视相控阵天线测试

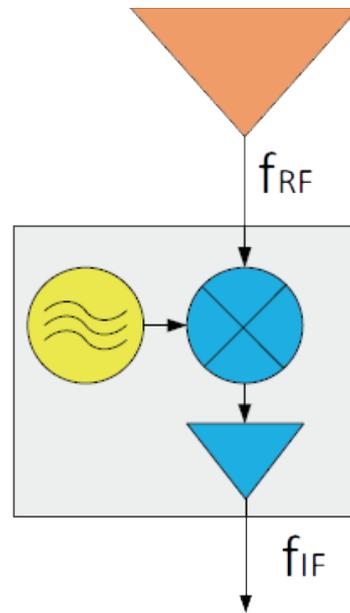
使用双音法测试内置本振的相控阵天线

相控阵天线已广泛应用于移动通信和卫星通信，在OTA暗室中使用矢量网络分析仪进行校准、无源和有源测试已经较为成熟。但对于内置本振的相控阵由于输入输出频率不一致且本振无法接入，常规测试方法无法进行稳定的幅相测试。本期将介绍一种新颖的测试方法，该方法巧妙使用R&S®ZNA矢量网络分析仪输出双音信号对内置本振的相控阵天线进行近场测试。

相控天线阵面的集成度越来越高，有些阵面将收发上下变频单元也直接集成在阵面中且变频单元的本振源也一同集成在阵面中，这导致常规矢量网络分析仪无法进行稳定幅相测试。而在相控天线的近场测试中，我们必须通过测得天线近场的幅相分布数据才能进行近场到天线远场特性的转换。针对这一业界难题，罗德与施瓦茨 (以下简称R&S) 结合R&S®ZNA矢网内部多激励相参源与双数字接收机架构提出双音法进行内置本振相控阵天线近场测试的新方法。

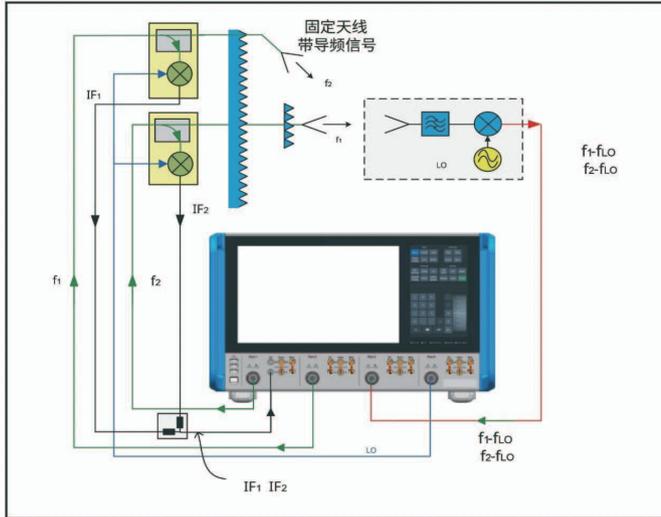
内置本振天线接收单元的特点

对于一个集成本振的天线接收单元来说 (如下图所示), 具有以下特点: 内置本振、本振无法使用线缆输入或输出。因此, 天线输出信号的相位随着天线接收激励信号相位和本振相位的变化而变化。由于本振信号的相位未知且可能不稳定随时间漂移, 矢量输入 f_{RF} 时我们只能得到天线接收信号的相位, 而无法得知本振相位的变化。这就对我们的测试提出了新的挑战: 如何去成本振带来相位影响?



解决方法

借助两个测试天线，其中一个天线固定位置不动，另外一个天线作为天线近场测试的探头天线在待测天线的近场进行扫描移动。然后，结合R&S®ZNA独有的双音法混频测试的技术，可以解决上述问题。测试框图如下：



使用ZNA的两个端口发出两个频率相近的信号 f_1 和 f_2 ，分别送给两只天线，之后，两只天线发出的信号由同一个阵面天线进行接收，那么此时该接收阵面天线接收到的信号为一个双音信号，同时这两个信号分别与内置的本振进行混频，接收阵面输出频率为 f_1-f_{LO} 和 f_2-f_{LO} 的双音信号。

该方法不是直接测量阵面天线输入和输出之间的相位，而是使用ZNA测量双音信号的两个音之间的相位差。分别测试阵面天线的输入端和输出端的双音相位差值。使用公式(1)和(2)， $\Delta\phi$ 为天线阵元输出端双音相位的差值减去输入端的差值。在被测天线的视轴位置， $\Delta\phi$ 被归一化为零。此后，当探头天线在待测阵面天线空间近场移动时， $\Delta\phi$ 的相对测量结果反映了待测阵面天线的近场相位变化。

此时，对于天线接收阵面，相位的变化如下式：

$$\Delta\phi = (\phi_{1out} - \phi_{LO} - \phi_{2out} \pm \phi_{LO}) = (\phi_{1in} - \phi_{2in}) \quad (1)$$

注意到上式中的两个 ϕ_{LO} 可以消去，可以简化为：

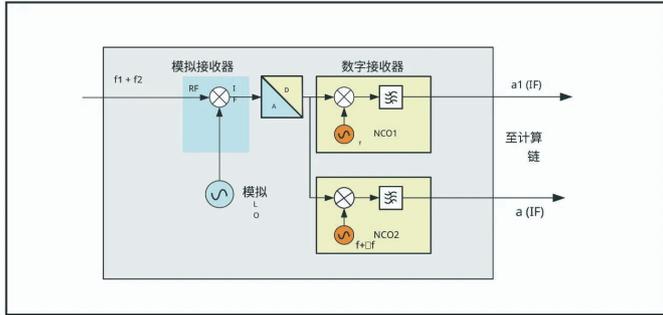
$$\Delta\phi = (\phi_{1out} - \phi_{2out}) = (\phi_{1in} - \phi_{2in}) \quad (2)$$

上式中 ϕ_{1in} 和 ϕ_{2in} 均由ZNA给出，而 ϕ_{1out} 和 ϕ_{2out} 均输入回ZNA。

可以观察到，本振的相位偏差（公式(1)中的 ϕ_{LO} ）对阵面天线的两个下变频载波具有相同影响，因此本振的变化在公式(1)中相互抵消，最终得到公式(2)。因此，通过这种双音比较的方法，由嵌入式本振相位引起的偏差对测量的准确性和稳定性几乎没有影响。

双数字接收机架构

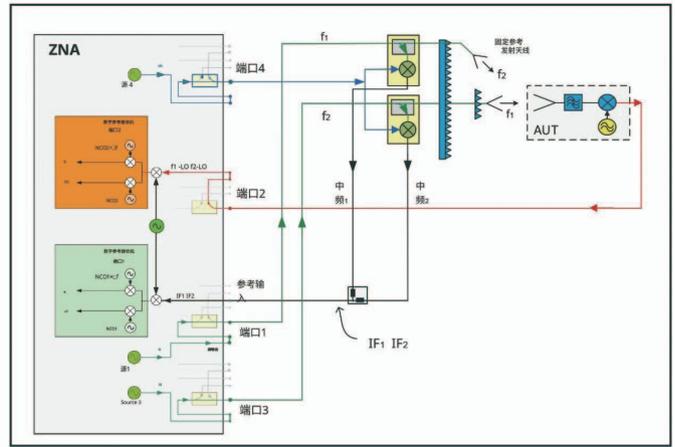
为了测试不同频率的两个双音信号之间的相位，R&S®ZNA 矢量网具有特殊的接收机架构。该接收机架构中，两个信号均被下变频至矢量网接收机的中频，中频信号数字化之后，被分成两路输入并行的数字 (I路和Q路) 混频器和滤波器，这两条路径配有两个独立的数控振荡器 (NCO)，这些NCO频率差与两个激励双音射频信号的频率差相同，因此，两个不同频率的信号可以被变频至相同的频率，从而实现稳定的相位差测试。如下图所示，不同的信号f1和f2最终被混频为相同的中频a1和a'1。



对于同一个接收机，ZNA可以同时显示两个波量，例如在1端口的参考接收机显示信号a1和a'1，或在2端口的测量接收机处测量天线阵元的输出信号b2和b'2。

双音信号的频率差可以设置任意值，但需足够小以确保两个信号都能在ZNA数字接收机中处理，同时频率差还需大于数字下变频后数字中频滤波器的带宽，以便每个信号均可独立测量而互不干扰。

测试方法



上图为ZNA进行测试的一种接线方式，其中1端口输出单音给移动的天线，3端口输出另外一个单音信号给固定天线，2端口对天线阵元接收并下变频的双音信号进行接收，此时，需要测试的波量比为a1/a'3和b2/b'2。此时的DUT的相位为： $(\frac{b2}{b'2}) / (\frac{a1}{a'3})$

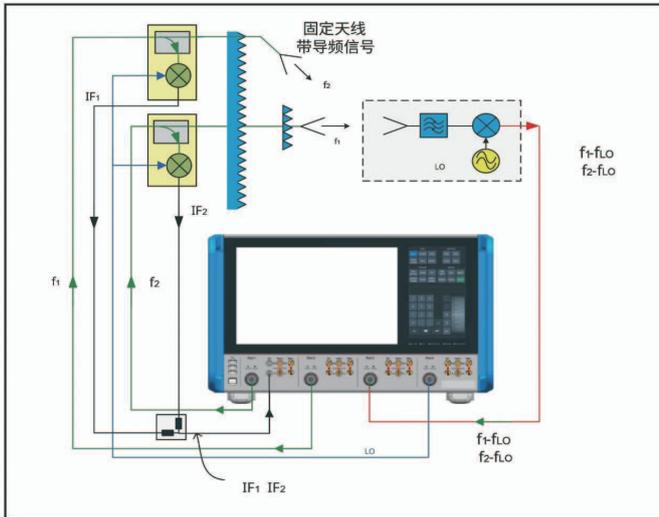
另外，当移动的探头位于轴线 (Boresight) 处时，记录此时的相位值

$$\left(\frac{b2_{Bs}}{b'2_{Bs}}\right) / \left(\frac{a1_{Bs}}{a'3_{Bs}}\right)$$

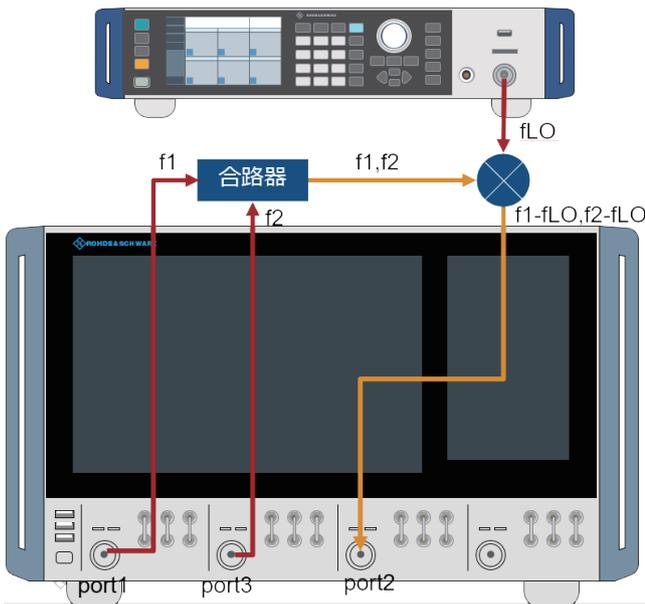
以此处 (最大值) 作为基准进行归一化，那么可以由下式计算天线近场方向图的归一化幅度和相位

$$Antenna_Patten = \frac{\left(\frac{b2}{b'2}\right) / \left(\frac{a1}{a'3}\right)}{\left(\frac{b2_{Bs}}{b'2_{Bs}}\right) / \left(\frac{a1_{Bs}}{a'3_{Bs}}\right)}$$

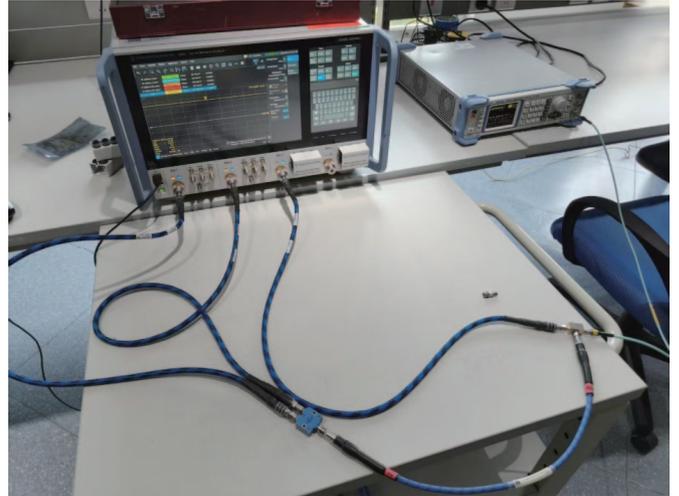
测试实例



由于在实验室中测试，将上述的天线连接结构进行简化，使用合路器替代两个天线



如左下图所示，1，3端口分别输出频率不同的单音信号，经过合路器之后，输入混频器，混频器的本振由独立的信号源提供，最终中频信号输入值矢网的2端口。之后，为了模拟探头的移动，在f1输入合路器前增加衰减器再次进行测试。实际接线如下图：



设置矢网的测试频率为1.2 G-2.2 GHz，射频f1=1.2 GHz-2.2 GHz由一端口输出，f2=1.201 GHz-2.201 GHz由三端口输出，功率-10 dbm，信号源提供固定本振1.1 GHz，中频为100 M-1.1 GHz输入至矢网的二端口。

ZNA的端口设置如下所示

Port	Lab Frequency	Arbitrary Power	Receiver Level	Input / Output	+
Port 1	20.00	ON	ON	Frequency Conversion	Frequency Result
Port 2	20.00	ON	ON	Frequency Conversion	Receiver Frequency
Port 3	20.00	ON	ON	Frequency Conversion	Receiver Frequency

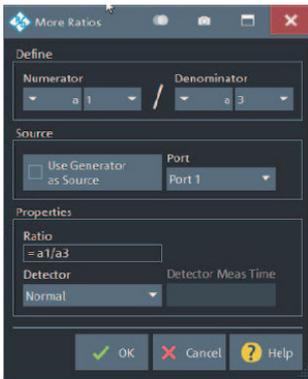
其中，需要将2端口的Δfrequency a' ,b' 设置为1 MHz。

3端口的频率由于设置为fb+1 MHz，计算中无需使用a'3，直接使用a3即可。

将IF Filter (analog) 设置为wideband:



输入信号需要测试的波量比为a1/a3,如下图所示:



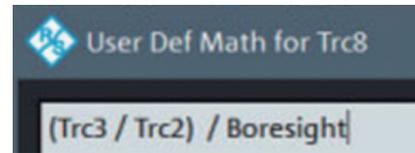
输出信号需要测试的波量比为b2/b' 2,如下图所示:



设置coherence mode on，测试结果如下



上图中，trc2为a1/a3,也就是输入相位，trc3为b2/b' 2,也就是输出相位，右下角的trc3Divtrc2表示的是 $\frac{b2}{b'2} / \frac{a1}{a3}$ ，在一开始设置为boresight模式，也就是最大值，上方的trc8为如下公式

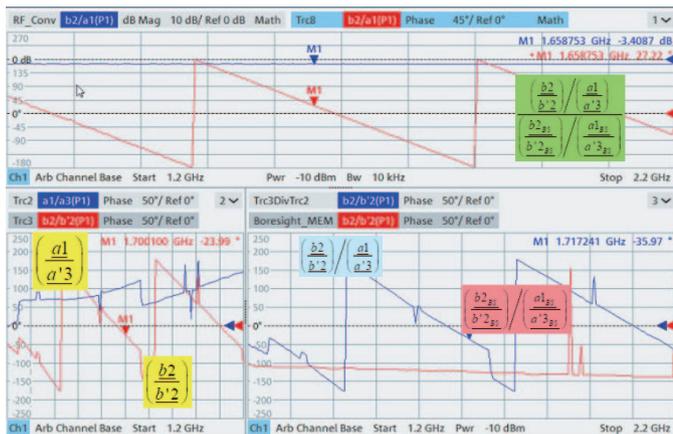


模拟的是视轴归一化之后的值，此时为1，即:

$$\frac{\left(\frac{b2}{b'2}\right) / \left(\frac{a1}{a3}\right)}{\left(\frac{b2}{b'2}\right) / \left(\frac{a1}{a3}\right)}$$

总结

之后，在1端口与合路器之间增加3dB衰减器来模拟探头的偏移，此时测试结果如下：



此时，trc8的数据即为在这个位置时，测量得到的天线的相位信息。

在实际的天线测试中，移动天线并持续进行测试，可以达到整个近场各个位置的幅度相位信息，再进行近远场变换计算之后，可以得到扫频范围内，各个频点的天线方向图信息。

由上述示例可见，在使用R&S®ZNA矢量网络分析仪对集成内置本振的相控阵接收模块进行近场测试时，具备多项系统级优势：

- ▶ 支持内置本振混频天线单元的校准：ZNA独有的双音法测试，能够适配各类混频器结构的天线模块，无需外部本振源参与，即可实现对天线阵面幅度与相位响应的精确标定。
- ▶ 无需对矢网进行传统校准即可直接测试：该方案采用相对值进行测试，简化了传统多步校准流程，提升了系统搭建与测试效率。
- ▶ 支持扫频测试，突破点频限制：不同于传统点频校准方法，ZNA可在宽频带范围内进行连续扫频测量，获取天线单元在工作频带内的完整频响特性，更全面快速地进行各个频点方向图的测试。
- ▶ 单台仪表实现完整测试，系统集成度高：仅需一台ZNA即可完成包括激励、下变频、分析与校准在内的全流程测量，极大简化测试平台结构，降低设备成本与系统复杂度，便于系统集成与维护。

更多NTN技术内容与罗德与施瓦茨解决方案请关注：



NTN技术方案合集



白皮书

增值服务

- ▶ 遍及全球
- ▶ 立足本地个性化
- ▶ 可定制而且非常灵活
- ▶ 质量过硬
- ▶ 长期保障

关于罗德与施瓦茨公司

罗德与施瓦茨科技集团开发、生产和销售种类广泛的专业电子产品。公司推出丰富的产品组合，旨在缔造一个更加安全的互联世界。在测试与测量、安全通信、网络和网络安全以及广播和媒体等市场，全球客户都信赖罗德与施瓦茨及其提供的先进解决方案。在成熟的业务领域之外，罗德与施瓦茨还大力投资人工智能、工业物联网(IIoT)、6G、云解决方案和量子技术等各种未来技术。自公司创立以来的90多年，罗德与施瓦茨是众多行业客户的可靠合作伙伴。

罗德与施瓦茨(中国)科技有限公司

800-810-8228 400-650-5896

info.china@rohde-schwarz.com

www.rohde-schwarz.com.cn

官方微信



官方视频号



Certified Quality Management

ISO 9001

Certified Environmental Management

ISO 14001

可持续性的产品设计

- ▶ 环境兼容性和生态足迹
- ▶ 提高能源效率和低排放
- ▶ 长久性和优化的总体拥有成本

北京

北京市朝阳区紫月路18号院1号楼(朝来高科技产业园)罗德与施瓦茨办公楼 100012

电话: 010-56108074

传真: +86-10-64312828

上海

中国上海市浦东新区张江高科技园区盛夏路399号亚芯科技园11号楼

罗德与施瓦茨办公楼 201210

电话: 021-63750018/63750028

深圳

深圳市南山区高新南环路43号 威新软件科技园1号楼2楼东/南翼 518057

电话: 0755-22985864

传真: +86-755-82033070

成都

中国成都市高新区天府大道 天府软件园A4号楼南一层 610041

电话: 028-62677640

传真: +86-28-85194550

西安

西安市高新区锦业一路56号 研祥城市广场5楼502室 710065

电话: 029-83663470

传真: +86-29-87206500

武汉

中国湖北省武汉市武汉经济技术开发区201M地块海棠路6号

华中智谷项目二期D2办公室2层1号 430051

电话: 025-83484142

R&S®是罗德与施瓦茨公司注册商标

商品名是所有者的商标 | 中国印制

2025年12月 | 从测试角度透视相控阵天线测试

文件中没有容限值的数据没有约束力 | 随时更改