

# 5G Massive MIMO 天线阵列

Discussion on Calibration Method of 5G Massive MIMO Antenna Array

## 校准方法探讨

王波<sup>1</sup>, 栾帅<sup>2</sup>, 邱涛<sup>1</sup>, 郭爽楠<sup>1</sup> (1. 中国联合网络通信集团有限公司, 北京 100033; 2. 中国联通网络技术研究院, 北京 100048)

Wang Bo<sup>1</sup>, Luan Shuai<sup>2</sup>, Qiu Tao<sup>1</sup>, Guo Shuangnan<sup>1</sup> (1. China United Network Communications Group Co., Ltd., Beijing 100033, China; 2. China Unicom Network Technology Research Institute, Beijing 100048, China)

### 摘要:

Massive MIMO 天线是 5G 系统的关键技术之一, 可以通过 3D 波束赋形技术实现系统按需覆盖, 为保证赋形的正确性与可靠性, 天线阵列的校准成为 5G Massive MIMO 天线的关键技术之一。结合目前行业内容的研究进展, 探讨适用于 5G 天线的校准方法, 并探讨了引起校准误差的主要因素, 可为后续校准方法的深入研究提供借鉴。

### Abstract:

Massive MIMO antenna is one of the key technologies of 5G system, the system can be implemented on demand by 3D beam forming technology, in order to ensure the correctness and reliability of the form, the calibration of antenna array becomes one of the key technologies of 5G Massive MIMO antenna. It combines the current research progress of the industry content, the calibration method suitable for 5G antenna is discussed, and the main factors that cause the calibration error are discussed, which can provide reference for further study of calibration method.

### Keywords:

Massive MIMO; 5G; Calibration

### 关键词:

Massive MIMO; 5G; 校准

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2019.03.007

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1007-3043(2019)03-0032-03

引用格式: 王波, 栾帅, 邱涛, 等. 5G Massive MIMO 天线阵列校准方法探讨[J]. 邮电设计技术, 2019(3): 32-34.

## 0 引言

Massive MIMO 天线中有源模块和天线阵列高度集成, 有源模块的接收、发射通道存在多种误差来源, 可分为时变误差和非时变误差两大类。其中时变误差包括 T/R 通道随环境温度、时间、工作频率变化时, 放大器的相位和增益变化; 混频器件特性漂移、滤波器件时延及幅/相失真、I/Q 通道的非完全正交、天线阵列在室外随环境的形变等。非时变误差包括阵列加工误差、几何位置安装误差、单元互耦、方向图边缘效应、馈线及分配网络误差、连接器的一致性等。在各种误差的影响下, 阵列的性能将受到影响。因此, 探

讨适合于 5G 天线的阵列校准方法具有重要现实意义。

根据校准信号获取位置的差别, 可将校准方法分为“路校准”和“场校准”2 种, “路校准”方法的校准信号来自传输射频信号的传输线, 常用的做法是在微带线或同轴线中设计定向耦合器; “场校准”方法的校准信号取自阵列的辐射场, 通常在辐射近场中设置信标天线, 并与阵列中各单元模块建立收、发链路。

## 1 “路校准”方法介绍及分析

对于有  $N$  个射频模块的 Massive MIMO 天线, 应用路校准时需设计 1 分  $N$  的等功率分配器, 并在每个分配器末端连接定向耦合器, 图 1 示意了 8T8R MIMO 天线的校准电路, 通过记录各模块端口 (图 1 中的 I/O port) 至校准端口 (图 1 中的 Cal port) 的传输相应值, 就

收稿日期: 2019-01-31

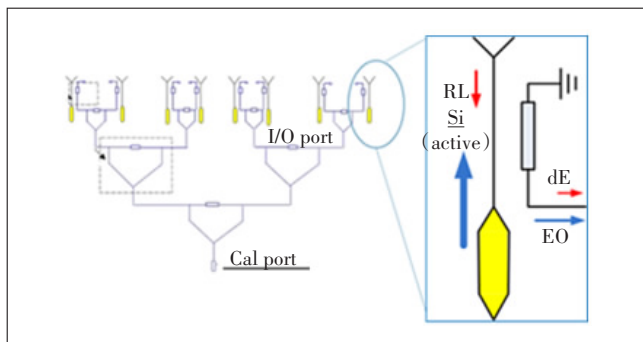


图1 8T8R MIMO阵列的校准电路

可以修正各模块中从数字基带至射频端口的通道误差。实际应用中,路校准方法存在以下误差因素:

- a) 因定向耦合器加工误差带来的性能差异。
- b) 定向耦合器受自身输入端(与射频模块相连接)阻抗影响带来的性能差异。
- c) 定向耦合器受输出端(与天线模块相连接)阻抗差异带来的性能差异。

在Massive MIMO 天线中,天线模块的阻抗除受模块在阵列中的位置、天线外罩与各模块的距离影响外,还受天线的波束状态的影响,对定向耦合器的输出端而言,天线模块呈现的是动态的有源阻抗。

为进一步说明天线端阻抗对耦合通道的影响,图2给出了量化分析。

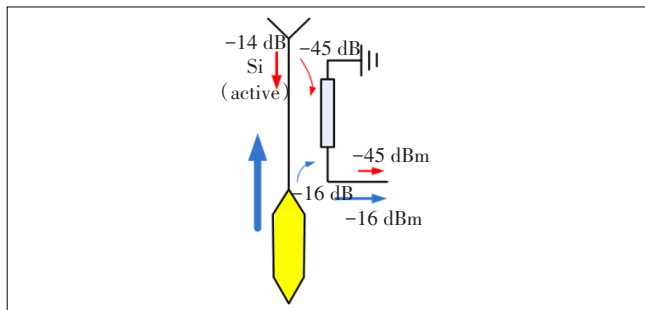


图2 定向耦合器受天线模块反射信号的影响

图2中假设入射信号为0 dBV,定向耦合器的耦合为-16 dB,定向性为-15 dB,天线模块回波损耗为-14 dB(对应VSWR=1.5)。对照图1中的符号有:

$$EO = -16 \text{ dBV} = 0.1585 \text{ (线性)}$$

$$\text{Mag}(dE) = -45 \text{ dBV} = 0.0056 \text{ (线性)}$$

考虑到dE实际上为复矢量信号,其相位可能在0~360°之间变化(如图3所示), $E' = 0.1585 \pm 0.0056 \in [0.1529, 0.1641]$ ,转换为dB值为: $E'(\text{dB}) = [-16.3, -15.7]$ ,对应的误差Error≈0.6 dB。

通过算例表明,天线模块-14 dB(对应VSWR=

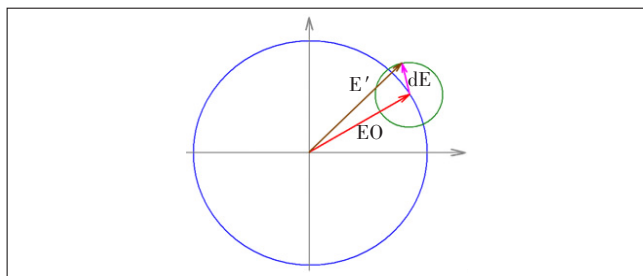


图3 反射信号(dE)造成的误差

1.5)的回波损耗将造成校准电路0.6 dB的幅度误差。实际的Massive有源天线中,各天线模块、射频模块存在阻抗差异,同时天线模块的阻抗还随波束状态的变化而变化,将给校准电路带来更大的误差,具体的误差分析可根据上述原理展开。

下面补充解释天线模块的阻抗随波束状态改变的原理。如图4所示, $a$ 代表天线模块入射信号(即波束权值,与天线波束相状态对应), $b$ 代表反射信号。

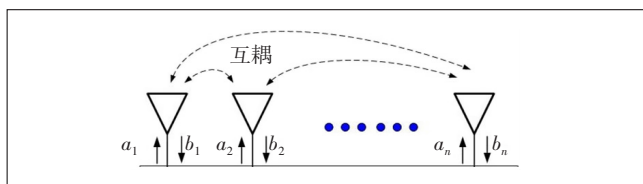


图4 阵列天线中的互耦现象

根据S参数定义,模块m的反射信号 $b_m$ 可表示为:

$$b_m = \left( a_m + \sum_n S_{mn} a_n \right) \quad (1)$$

对应的有源回波损耗为:

$$20 \times \lg s_{mm(\text{active})} = 20 \times \lg \left( \frac{b_m}{a_m} \right) \quad (2)$$

由式(2)可知,与天线波束状态改变对应的入射信号 $a_m$ 会直接影响天线端口的回波损耗,根据图2和图3的分析,端口的回波又会影响校准信号。因此,系统工作时校准的时机选择非常重要,最好能避免在各端口同时工作的合成波束状态下进行校准,避免各端口的波束权值不相同造成额外的校准误差。

## 2 “场校准”方法介绍及分析

适合5G天线的场校准方法有2种。第1种是“辅助单元法”,如图5所示,在天线内部选择少量位置,设置一些辅助单元。该方法需要预先获取辅助单元与各有源模块的传输系数,产品使用过程中,适时监测辅助单元与有源模块的传输系数,并于初始系数做对比,实现误差修正。

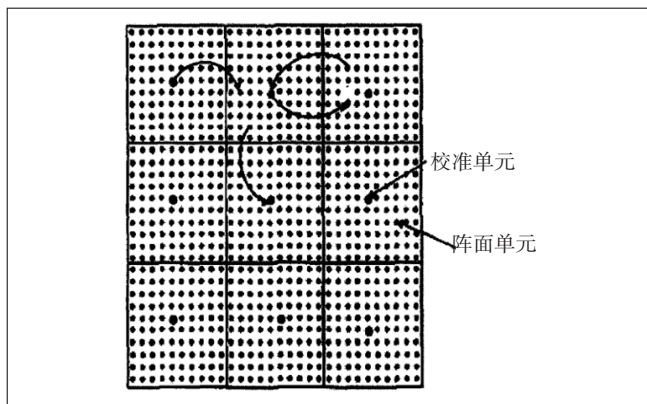


图5 “辅助单元法”应用于阵列校准

第2种是“自校准法”,如图6所示,图6中显示了阵中单元 $m$ 和周围6个单元,带箭头的曲线代表从 $m$ 单元到 $n$ 单元或其他单元的互耦传输系数。通道间的误差系数可以用旋转矢量法进行求解。

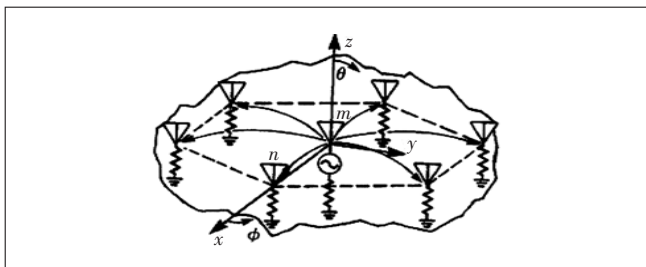


图6 “自校准法”应用于阵列校准

图7示意了旋转矢量法的求解过程, $C$ 代表被校准通道周围各单元都工作时对校准通道产生的耦合信号,任意选出其中1个单元 $B$ ,并在 $0\sim 360^\circ$ 范围内改变单元 $B$ 的发射(或接收)相位,使合成的耦合信号 $C$ 出现最大( $C_{\max}$ )和最小值( $C_{\min}$ )。

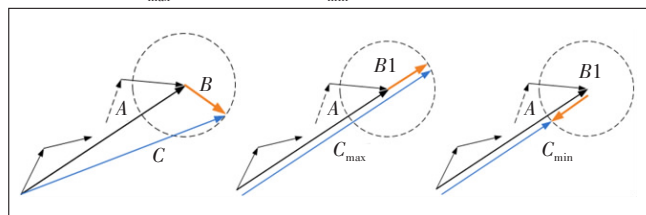


图7 旋转矢量法的求解过程

由矢量运算法则可知:

$$A = \frac{1}{2}(C_{\max} + C_{\min}) \quad (3)$$

$$B = C - A \quad (4)$$

通过对各个单元都进行相位调整,就可以获得每个单元对校准通道的传输系数,实现通道误差修正。

从上述分析可知,原理上,场校准可通过使用专用的“辅助单元”或直接使用阵中的某个单元,但校准

过程获取的传输系数必须和已知的系数做对比才能最终确定通道误差。因此,校准通道传输系数的稳定性是场校准方法应用的关键。

图8示意了“场校准”方法的主要影响因素,其中的 $T_n$ 代表传输系数。由于“场校准”的传输系数取自天线辐射场,容易受外界因素影响,因此“场校准”方法的误差更难控制。

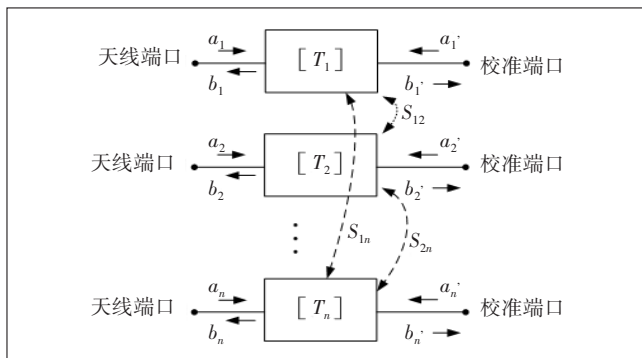


图8 “场校准”方法的主要影响因素

### 3 总结

本文介绍、分析、对比了适合于Massive MIMO的“路校准”和“场校准”方法,特别分析了影响各种方法的误差因素,提出了应用校准方法过程中的注意事项,可为5G Massive MIMO天线系统的深入研究提供有益借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 见伟,张玉,韩名权. 阵列天线通道误差对波束性能的影响分析[J]. 无线电工程,2014(11).
- [2] 谢斌斌,张骅. 通道误差对波束形成性能的影响分析[J]. 现代导航,2014(3):192-196.
- [3] 虞萍,颜红. 有源相控阵天线T/R组件幅相检测[J]. 现代雷达,1997(3):65-67.
- [4] AGRAWAL A, JABLON A. A calibration technique for active phased array antennas[C]// IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. IEEE, 2003: 223-228.
- [5] 阎鲁滨. 相控阵天线幅相校正的简单方法[J]. 航天器工程,2006(4):43-45.

#### 作者简介:

王波,毕业于北京邮电大学,高级工程师,博士,主要从事无线新技术研究及无线网络建设项目管理工作;栾帅,毕业于西南交通大学,高级工程师,主要从事移动通信系统天线新技术研究及标准化研究工作;邱涛,毕业于山东工业大学,高级工程师,主要从事无线网络建设项目管理工作;郭爽楠,毕业于北京联合大学,高级工程师,主要从事无线网络规划设计工作。