SCIENTIA SINICA Informationis





# 5G 毫米波大规模 MIMO 阵列失效特性分析

蒯乐,周后型,陈继新,洪伟\*

东南大学信息科学与工程学院,南京 210096 \* 通信作者. E-mail: weihong@seu.edu.cn

收稿日期: 2020-08-20; 修回日期: 2020-10-25; 接受日期: 2020-12-30; 网络出版日期: 2021-06-04

国家重点研发计划 (批准号: 2018YFB1801602) 和国家自然科学基金 (批准号: 61627801, 61861136002) 资助项目

**摘要** 大规模 MIMO 阵列是第五代移动通信 (5G) 的关键技术之一. 然而, 阵列在经历了长时间工作 之后, 会出现部分通道失效的情况, 从而对大规模 MIMO 阵列的辐射性能造成不同程度的影响. 本文 针对 5G 毫米波大规模 MIMO 阵列中不同数量通道失效以及失效通道处于不同失效状态时的辐射特 性进行了系统的仿真与实验研究, 并在此基础上对 MIMO 阵列的辐射性能进行了统计分析. 提出并建 立了大规模 MIMO 阵列部分通道失效状态下的方向图参数概率模型, 对概率模型的结果和统计分析 的结果进行了对比, 验证了概率模型的正确性和有效性, 所给出的概率模型可以代替基于大量样本的 仿真或实验结果进行统计分析的方法, 对有不同比例的通道失效及不同失效状态时阵列的辐射特性进 行快速评估, 直接得出阵列主要辐射参数的期望值和方差. 此外, 本文还分析了不同失效比例和状态 下主要辐射特性的概率分布.

关键词 5G, 大规模 MIMO, 毫米波, 有源天线阵列, 失效

#### 1 引言

大规模 MIMO (massive MIMO) 作为 5G 的关键技术之一, 空间分辨率与传统 MIMO 相比显著增强, 能深度挖掘空间维度资源, 使得网络中的多个用户可以在同一时频资源上与基站同时进行高速通信, 从而大幅度提高频谱效率. 此外, 大规模 MIMO 利用大量天线将波束集中在很窄的范围内, 从而大幅度降低干扰和发射功率, 提高功率效率. 当天线的数量足够大时, 既可保证最佳线性预编码、线性检测器性能, 又可忽略噪声和不相关干扰的影响<sup>[1~4]</sup>.

目前 5G 技术在 sub-6G 频段已经开始大规模商业化应用 <sup>[5]</sup>.为了获得更多的频谱资源以实现更大的通信带宽与速率, 5G 移动通信正在朝着高频方向发展 <sup>[6~11]</sup>.毫米波频段具有丰富的可用频谱资源,已成为未来 5G 发展的方向 <sup>[12,13]</sup>.因此,毫米波 5G 大规模 MIMO 阵列也成为了人们研究的热

引用格式: 蒯乐, 周后型, 陈继新, 等. 5G 毫米波大规模 MIMO 阵列失效特性分析. 中国科学: 信息科学, 2021, 51: 1156-1167, doi: 10.1360/SSI-2020-0262 Kuai L, Zhou H X, Chen J X, et al. Analysis on the characteristic of millimeter-wave 5G massive MIMO array with failed elements (in Chinese). Sci Sin Inform, 2021, 51: 1156-1167, doi: 10.1360/SSI-2020-0262

© 2021《中国科学》杂志社

点<sup>[13~15]</sup>. 毫米波大规模 MIMO 阵列在正式投入使用前, 需要对包含天线单元在内的各个有源通道进 行校准和测试. 阵列在经过校准之后, 可以具有十分理想的波束成形与扫描性能. 然而, 在实际应用中, 大规模 MIMO 阵列在经历了较长时间的连续工作之后, 由于温差、老化等环境因素的影响, 电性能会 出现波动, 从而使阵列偏离原来的校准状态, 波束成形与扫描性能出现一定程度的下降. 而对于长期 连续工作的大规模 MIMO 阵列, 甚至会由于高低温、老化和电路故障等, 出现部分通道不同程度失效 的情况. 因此, 有必要对大规模 MIMO 阵列在部分通道失效后的辐射特性, 如增益、副瓣电平和波束 宽度等的变化进行研究.

文献 [16] 研究了利用近场扫描诊断失效通道的方法. 文献 [17~19] 研究了基于阵列辐射方向图数 据,利用人工神经网络、支持矢量机等算法确定具体天线阵列中失效通道的数量、位置与状态的方法. 为了抵消和补偿失效通道对相控阵辐射性能的恶化,人们利用遗传算法、有源幅度加权法、交叉频谱 法、线性估计法等方法,对阵列中仍处于正常工作状态下的通道的幅度与相位作出相应的优化,使优 化后的阵列方向图尽可能地接近阵列没有通道失效时的方向图性能<sup>[20~25]</sup>.这些方法在失效通道数量 不多时,可以起到一定的作用.但当失效通道占比较高时,通过补偿的方法则难以使故障天线恢复到 接近正常状态下的性能.因此,需要有一种对不同比例的通道处于不同失效状态时天线性能的恶化程 度进行快速分析的方法,确定天线辐射特性的恶化程度,为处理故障天线提供决策依据.由于阵列理 论解析公式不包含阵元间互耦的影响,长期以来,人们在设计和分析天线阵列性能时更多地依赖全波 仿真与实际测试, 仅将解析公式用于对性能的粗略评估. 然而, 随着阵列规模的增大, 用全波仿真和测 试的方法分析和评估阵列性能所消耗的时间和资源也越来越大. 本文基于 Q 波段 5G 毫米波大规模 MIMO 阵列, 首先对有源阵列中不同比例的通道处于失效状态下的主要辐射性能进行了理论分析、全 波仿真及实验研究,通过对不包含互耦影响的解析公式的计算结果与包含互耦影响的全波仿真、测试 结果进行对比,验证了用解析公式分析大型实际阵列失效特性的可信性,从而替代全波仿真或实验对 阵列失效特性进行分析.在此基础上,提出了阵列中有部分通道失效状态下方向图参数的概率模型,用 于快速获得各种方向图参数的数字特征. 最后, 对大型阵列的辐射特性进行了统计分析, 给出了失效 状态下阵列方向图参数的概率密度分布.

## 2 大规模 MIMO 阵列失效状态下辐射方向图的计算、仿真与实验对比研究

#### 2.1 部分通道失效状态下的阵列辐射方向图计算公式

如图 1(a) 所示平面二维 MIMO 阵列, 假设每个通道对应一个天线阵元. 沿 *x* 方向有 *M* 个阵元, 沿 *y* 方向有 *N* 个阵元. 定义阵列中位于第 *p* 行、第 *q* 列的阵元的坐标为 (*p*,*q*). 为了表述方便, 对阵 列中各阵元按照如图 1(b) 所示的规则与次序进行编号. 根据天线理论, 阵列的总场方向图可以表示为

$$f(\theta,\varphi) = f_1(\theta,\varphi) \cdot f_a(\theta,\varphi) = f_1(\theta,\varphi) \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N A_{p,q} \xi_{p,q} \cdot e^{j(qkd\sin\varphi\sin\theta + pkd\cos\varphi\sin\theta + \psi_{p,q} + \eta_{p,q})}, \quad (1)$$

其中  $f_1(\theta, \varphi)$  是阵列单元的方向图函数,  $f_a(\theta, \varphi)$  是图 1(a) 所示阵列的阵因子方向图函数.  $A_{p,q}$  和  $\psi_{p,q}$  分别表示坐标为 (p,q) 的阵元的馈电幅度和馈电相位的设计值, d 为阵列中相邻阵元间的距离. 当阵 列中有通道发生失效时, 其对应阵元的实际馈电幅度和相位将与设计值发生偏离. 为反映通道失效对 阵列方向图的影响, 引入  $\xi_{p,q}$  和  $\eta_{p,q}$  分别表示坐标为 (p,q) 的阵元在实际工作时的馈电幅度与设计 值的比值及馈电相位相对设计值的偏差量. 如果阵列中的失效通道为彻底损坏, 完全无输出信号, 即  $\xi_{p,q} = 0$ , 我们定义这种状态为完全失效状态, 分析时按完全关断来考虑. 阵列中失效的通道往往并非



#### 图 1 二维阵列示意图及阵元编号规则

Figure 1 Illustration of 2D antenna array and numbering of its antenna elements. (a) Illustration of 2D antenna array; (b) numbering of antenna elements



Figure 2 Illustration of Yagi-Uda antenna with two directors

完全失效, 而是处于正常与完全失效之间的中间状态, 其幅度和相位均与通道在正常状态下的幅度、 相位值有一定程度的偏离, 对应的阵元仍会有部分辐射, 因此不能按照完全关断来考虑. 这种状态定 义为部分失效状态. 在部分失效状态下, 对于坐标为 (p,q) 的失效阵元,  $\xi_{p,q}$  和  $\eta_{p,q}$  的取值范围分别为  $0 < \xi_{p,q} < 1, -\pi < \eta_{p,q} \leq \pi$ . 因此对于二维平面阵, 根据式 (1) 便可计算阵列中有任意数量的通道发 生完全失效或部分失效时的阵列总场方向图.

#### 2.2 部分通道失效状态下的阵列辐射方向图的计算、仿真与实验结果

基于上述概念, 以一个反射面上带有两个引向器的印刷八木天线作为辐射单元的实际的 4×16 通 道 Q 波段 5G 毫米波大规模 MIMO 阵列为例, 利用式 (1) 计算了其在 40 GHz 处的多种不同失效案 例的辐射方向图, 并与全波仿真和部分实验结果进行了对比研究.

实际阵列中的印刷八木天线阵元的示意图如图 2 所示.图中的 ① 为有源振子,② 和 ③ 均为引向器.它们的长度分别为 2*l*<sub>1</sub>, 2*l*<sub>2</sub> 和 2*l*<sub>3</sub>.有源振子到反射地平面的距离为 *d*<sub>1</sub>,有源振子 ① 到引向器 ② 的距离为 *d*<sub>2</sub>,引向器 ② 与 ③ 之间的距离为 *d*<sub>3</sub>.设振子 ①,②,③ 的波腹电流分别为 *I*<sub>1</sub>, *I*<sub>2</sub>, *I*<sub>3</sub>,有

源振子 ① 的辐射电阻为  $R_r$ ,则图 2 中八木天线的方向图函数  $f_1(\theta,\varphi)$  可表示为<sup>[26]</sup>

$$f_1(\theta,\varphi) = \frac{120}{R_r} \left| \sum_{v=1}^3 \left[ \frac{2[\cos(kl_v \sin\theta\cos\varphi) - \cos(kl_v)]}{\sqrt{1 - \sin^2\theta\cos^2\varphi}} \cdot \frac{I_v}{I_1} \sin\left(k\sum_{w=1}^v d_w \cos\theta\right) \right] \right|^2.$$
(2)

不失一般性,失效通道的编号 (即失效通道的位置) 用服从均匀分布的随机函数确定,对于失效 通道为完全失效的情况,令其对应的  $\xi_{p,q} = 0$ . 对于失效通道为部分失效的情况,则与失效通道对应 的  $\xi_{p,q}$  和  $\eta_{p,q}$  也用符合均匀分布的随机函数确定.为了使发生部分失效的案例更加符合工程实际且 更具代表性,将发生部分失效的通道的  $\xi_{p,q}$  的取值范围限定在 [0.3,0.8],  $\eta_{p,q}$  的取值范围不变,仍为 ( $-\pi, +\pi$ ]. 据此,以阵列中有 2 个阵元 (失效阵元占比为 3.125%)、4 个阵元 (失效阵元占比为 6.25%)、 8 个阵元 (失效阵元占比为 12.5%) 发生完全失效和部分失效的情况为例,分别随机生成 100 组失效案 例,将由式 (2)得到的结果对应地代入到式 (1)中,对这些失效案例的辐射方向图进行计算.同时,在 全波电磁仿真软件 HFSS 中对上述 4 × 16 通道的阵列进行建模,将上述各计算案例中的实际馈电幅 度  $A_{p,q}\xi_{p,q}$ 、相位  $\psi_{p,q} + \eta_{p,q}$ 分别代入 HFSS 模型,逐一对其全阵辐射方向图进行全波仿真.在实验研 究中,受实验资源的限制,无法对每种失效占比下的 100 个案例全部进行测试.因此,仅从中随机选取 部分案例进行了实际测试.测试中对上述阵列在发射状态下各通道的实际馈电幅度与相位在基带端进 行设置,使各个通道的基带信号经过上变频之后,实际阵列中阵元输出射频信号的幅度与相位与所选 取的失效案例的各对应阵元的幅度、相位一致,然后,在微波暗室中对其辐射场进行测量,得出对应失 效状态下全阵的远场辐射方向图.

所选取的失效案例的计算、仿真与实测结果的对比如图 3 所示.限于篇幅,图 3 仅给出了阵列中 有 2 个阵元发生完全失效、4 个阵元发生完全失效和 8 个阵元发生完全失效与部分失效的各一个案 例的对比结果.其中,图 3(a)和 (b)分别为阵列中有 2 个阵元发生完全失效时的水平面 (E 面)和垂 直面 (H 面)计算、仿真与实测方向图;图 3(c)和 (d)分别为阵列中有 4 个阵元发生完全失效时的水 平面 (E 面)和垂直面 (H 面)计算、仿真与实测方向图;图 3(e)和 (f)分别为阵列中有 8 个阵元发生 完全失效时的水平面 (E 面)与垂直面 (H 面)计算、仿真与实测方向图;图 3(g)和 (h)分别为阵列中 有 8 个阵元发生部分失效时的水平面 (E 面)与垂直面 (H 面)计算、仿真与实测方向图.从图 3 可以 看出,理论计算的结果中除增益比仿真和实验结果稍高一点外,阵列失效案例辐射方向图的波瓣形状、 波束宽度、副瓣电平及零点位置的计算、仿真及实测结果非常吻合,误差在可接受范围之内.因此,对 于大规模阵列失效特性的分析,可以用不含互耦因素的解析公式的计算结果替代全波仿真或实验所得 的结果,从而大大减少时间与资源消耗.

#### 3 大规模 MIMO 阵列失效的概率模型

对于每一种失效阵元占比,如果将由失效阵元的位置分布、馈电幅度与相位所确定的失效案例看 作独立的个体,全部失效案例则为总体,对于失效阵元均为完全失效的情况而言,总体的容量可能会非 常庞大.对于失效阵元均为部分失效的情况而言,总体则变为无限总体.第2节的方法都只能对一个 个具体的阵列失效案例逐一进行辐射方向图的计算和分析.然而,要研究总体的特征,通常是用基于 大量随机样本进行数理统计的方法来对其进行估计.随着统计样本容量的增加,仅方向图的获取和统 计都会占用很多的时间资源.因此,本文提出解析的概率模型用于计算和分析不同规模的阵列在不同 失效状态下的辐射特性的总体特征,代替基于大量样本的数理统计,不仅可以大大降低计算量、分析 的繁杂度,还可实现对不同比例阵元失效时的辐射性能进行快速评估.



图 3 (网络版彩图) 失效状态下阵列方向图计算、仿真与实验结果对比

**Figure 3** (Color online) Comparison between calculated, simulated and measured patterns of array with failed elements. (a) E-plane pattern with 2 channels completely failed; (b) H-plane pattern with 2 channels completely failed; (c) E-plane pattern with 4 channels completely failed; (d) H-plane pattern with 4 channels completely failed; (e) E-plane pattern with 8 channels completely failed; (f) H-plane pattern with 8 channels completely failed; (g) E-plane pattern with 8 channel partially failed; (h) H-plane pattern with 8 channel partially failed

假设如图 1 所示阵列的 *M*×*N*个阵元中,有 *a*个阵元为发生完全失效的阵元,*b*个阵元为发生 部分失效的阵元,剩余的 *c*个阵元为正常工作的阵元 (*a*+*b*+*c* = *M*×*N*). 将阵列中的所有阵元的位 置按照一定的次序进行编号 (1, 2, ..., *a*+*b*+*c*). 每次均从上述 *a*+*b*+*c*个阵元中随机抽取一个阵元, 作不放回抽样. 将第 *i* 次抽到的阵元作为编号为 *i* 的位置上的阵元. 并将编号为 *i* 的位置上取到非失 效阵元记为事件 *B* (*i* = 1,2,...,*a* + *b* + *c*),则事件 *B* 的概率为

$$P(B) = \frac{c \cdot A_{a+b+c-1}^{i-1}}{A_{a+b+c}^{i}} = \frac{c}{a+b+c}.$$
(3)

由此可以看出, *P*(*B*) 与 *i* 无关, 即每一次抽到失效阵元的概率是一样的. 由于作不放回抽样, 各次抽取之间不是相互独立的.

用随机变量  $X_{p,q}$  表示在坐标为 (p,q) 的位置上抽取到正常工作阵元的个数,  $Y_{p,q}$  表示在坐标为 (p,q) 的位置上抽取到发生部分失效阵元的个数.显然,  $X_{p,q}$  和 (p,q) 服从 0-1 分布.其分布律可以写成:

由此可以计算出  $X_{p,q}$  和  $Y_{p,q}$  的期望值  $E(X_{p,q})$  和  $E(Y_{p,q})$  分别为

$$\mathcal{E}(X_{p,q}) = \frac{c}{a+b+c},\tag{4}$$

$$\mathcal{E}(Y_{p,q}) = \frac{b}{a+b+c}.$$
(5)

对于坐标分别为  $(p_1, q_1)$  和  $(p_2, q_2)$  的两个阵元,随机变量的乘积  $X_{p_1,q_1}X_{p_2,q_2}$  只有在两个阵元均为正常工作才为 1. 两个阵元中只要有 1 个取到的是失效阵元,  $X_{p_1,q_1}X_{p_2,q_2}$  即为 0. 因此

$$P(X_{p_1,q_1}X_{p_2,q_2}=0) = \frac{A_{a+b}^2 + C_{a+b}^1 C_c^1 + C_c^1 C_{a+b}^1}{A_{a+b+c}^2} = \frac{(a+b)(a+b+2c-1)}{(a+b+c)(a+b+c-1)},$$
(6)

$$P(X_{p_1,q_1}X_{p_2,q_2} = 1) = \frac{A_c^2}{A_{a+b+c}^2} = \frac{c(c-1)}{(a+b+c)(a+b+c-1)}.$$
(7)

为了描述阵元状态对阵因子方向图的影响,可将随机变量  $X_{p_1,q_1}$  和  $Y_{p_1,q_1}$  引入阵因子方向图函数 中. 令  $u = qkd\sin\varphi\sin\theta + pkd\cos\varphi\sin\theta + \psi_{p,q}$ ,图 1 中所示阵列的阵因子方向图函数可表示为

$$f_a(\theta,\varphi) = \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N \left( A_{p,q} \cdot e^{ju} \cdot X_{p,q} + A_{p,q} \xi_{p,q} e^{ju} \cdot e^{\eta_{p,q}} \cdot Y_{p,q} \right), \tag{8}$$

其中  $\xi_{p,q}$  代表坐标为 (p,q) 的阵元在发生部分失效时的馈电幅度与其正常工作时馈电幅度的比值;  $\eta_{p,q}$  代表坐标为 (p,q) 的阵元在发生部分失效时与其正常工作时的相位之差. 并使  $\xi_{p,q} \sim U(0,1)$ ,  $\eta_{p,q} \sim U(\pi, +\pi)$ .

令  $Z_{p,q} = g(X_{p,q}, Y_{p,q}, \xi_{p,q}, \eta_{p,q}) = A_{p,q} \cdot e^{ju} \cdot X_{p,q} + A_{p,q}\xi_{p,q}e^{ju} \cdot e^{j\eta_{p,q}} \cdot Y_{p,q}$ ,则阵因子方向图函数在  $(\theta, \varphi)$ 方向上的期望值为

$$\mathbf{E}[f_a(\theta,\varphi)] = \mathbf{E}\left(\sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N Z_{p,q}\right) = \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N A_{p,q} \cdot \mathbf{e}^{\mathbf{j}(qkd\sin\varphi\sin\theta + pkd\cos\varphi\sin\theta)} \cdot \frac{c}{a+b+c}.$$
 (9)

由于 Z<sub>p,q</sub> 是一个复随机变量,则 Z<sub>p,q</sub> 的方差为

$$D[g(X_{p,q})] = E\{[Z_{p,q} - E(Z_{p,q})][Z_{p,q} - E(Z_{p,q})]^*\}$$

1161

$$=A_{p,q}^{2}\left[\frac{c}{a+b+c}+\frac{1}{3}\cdot\frac{b}{a+b+c}-\frac{c^{2}}{(a+b+c)^{2}}\right].$$
(10)

 $\diamondsuit \ u_1 = q_1 k d \sin \varphi \sin \theta + p_1 k d \cos \varphi \sin \theta + \psi_{p_1,q_1}, \ u_2 = q_2 k d \sin \varphi \sin \theta + p_2 k d \cos \varphi \sin \theta + \psi_{p_2,q_2}, \ \bigcup$ 

$$\operatorname{Cov}(Z_{p_1,q_1}, Z_{p_2,q_2}) = \operatorname{E}\left\{ [Z_{p_1,q_1} - \operatorname{E}(Z_{p_1,q_1})] [Z_{p_2,q_2} - \operatorname{E}(Z_{p_2,q_2})]^* \right\}$$
$$= A_{p_1,q_1} A_{p_2,q_2} \operatorname{e}^{\operatorname{j}(u_1 - u_2)} \times \left[ \frac{c(c-1)}{(a+b+c)(a+b+c-1)} - \frac{c^2}{(a+b+c)^2} \right], \qquad (11)$$

同理可得

$$\operatorname{Cov}(Z_{p_2,q_2}, Z_{p_1,q_1}) = \operatorname{E}\left\{ [Z_{p_2,q_2} - \operatorname{E}(Z_{p_2,q_2})] [Z_{p_1,q_1} - \operatorname{E}(Z_{p_1,q_1})]^* \right\}$$
$$= A_{p_1,q_1} A_{p_2,q_2} \operatorname{e}^{\operatorname{j}(u_2 - u_1)} \times \left[ \frac{c(c-1)}{(a+b+c)(a+b+c-1)} - \frac{c^2}{(a+b+c)^2} \right].$$
(12)

将式 (11) 和 (12) 相加可得

$$\operatorname{Cov}(Z_{p_1,q_1}, Z_{p_2,q_2}) + \operatorname{Cov}(Z_{p_2,q_2}, Z_{p_1,q_1}) = 2A_{p_1,q_1}A_{p_2,q_2}\cos(u_1 - u_2) \times \left[\frac{c(c-1)}{(a+b+c)(a+b+c-1)} - \frac{c^2}{(a+b+c)^2}\right],$$
(13)

$$D\left(\sum_{p_1=1}^{M}\sum_{q_1=1}^{N}Z_{p_1,q_1}\right) = \sum_{p_1=1}^{M}\sum_{q_1=1}^{N}D(Z_{p_1,q_1}) + \sum\sum_{p_2,q_2}Cov(Z_{p_1,q_1}, Z_{p_2,q_2}).$$
(14)

因此, 阵因子方向图在  $(\theta, \varphi)$  方向上的方差为

$$D[f_{a}(\theta,\varphi)] = D\left(\sum_{p_{1}=1}^{M}\sum_{q_{1}=1}^{N}Z_{p_{1},q_{1}}\right)$$

$$= \sum_{p_{1}=1}^{M}\sum_{q_{1}=1}^{N}A_{p_{1},q_{1}}^{2}\left[\frac{c}{a+b+c} + \frac{1}{3} \cdot \frac{b}{a+b+c} - \frac{c^{2}}{(a+b+c)^{2}}\right]$$

$$+ 2\sum_{\substack{1+(p_{1}-1)M\\
(15)$$

对于方向图函数为  $f_1(\theta,\varphi)$  的阵元, 阵列的总场方向图在  $(\theta,\varphi)$  方向上的期望值和方差分别为

$$\mathbf{E}[f(\theta,\varphi)] = f_1(\theta,\varphi) \cdot \mathbf{E}\left(\sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N Z_{p,q}\right),\tag{16}$$

$$D[f(\theta,\varphi)] = f_1^2(\theta,\varphi) \cdot D\left(\sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N Z_{p,q}\right).$$
(17)

### 4 大规模 MIMO 阵列失效分析与统计算例

对于失效通道占比在 0%~12.5% 之间的每一种取值, 按照上文提出的概率模型及计算阵列总场方向图在 (θ, φ) 方向上期望值与方差的式 (16) 和 (17), 对一个 4 × 16 阵列在有不同数量的通道发生部

1162



**Figure 4** (Color online) Calculation results and statistical results of a 4 × 16 array with partially failed elements. (a) Gain; (b) HPBW; (c) E-plane FSLL; (d) H-plane FSLL

分失效时, 阵列的增益、E 面和 H 面半功率波束宽度 (half power beam width, HPBW)、第一副瓣电 平 (first side-lobe level, FSLL) 等参数的期望与方差进行了计算. 然后, 用与 2.2 小节中同样的方法和 规则确定失效阵元的位置、馈电幅度和相位, 对不同的失效通道数, 各产生 100 组阵列失效的随机样本, 分别用式 (1) 计算出各组样本的方向图, 并从中提取出阵列增益、E 面和 H 面的半功率波束宽度、第一副瓣电平等参数, 计算出各参数的统计量, 即均值、方差等. 最后, 将基于概率公式计算得出的结果与基于大量随机样本的数理统计的结果进行比较, 如图 4 所示.

从图 4 可以看出,对于每一种失效通道数 (失效通道占比),阵列增益、半功率波束宽度和副瓣电 平的期望和统计均值高度吻合,基于概率模型和式 (17) 计算得出的方差和统计方差也具有很好的一 致性.随着失效通道个数的增加,示例阵列的 E 面和 H 面半功率波束宽度的期望和统计均值均无明 显的变化趋势,方差逐渐增大.图 4(c)和 (d)中所示的副瓣电平为副瓣电平的绝对数值,其期望和均 值随失效通道数的增加呈逐渐下降的趋势,但这并不代表随着失效通道数的增加,阵列的副瓣得到改 善.如果将第一副瓣电平写成其绝对数值与图 1(a)中阵列增益的比值的形式,可看出其期望值基本不 随失效通道占比的改变而发生变化.但方差呈现出逐步增大的变化趋势.图 4 中的结果表明,用本文 提出的概率模型及式 (16)和 (17)计算得出的阵列辐射性能的结果与基于大量随机样本的数理统计得 出的结果高度吻合,从而验证了本文提出的概率模型的准确性和有效性,可以代替基于大量样本的数 理统计的方法,实现对不同比例阵元失效时的辐射性能进行快速评估.

#### 5 大规模 MIMO 阵列部分通道失效状态下方向图参数的分布特性

通过前面的分析与推导,本文得出了阵列在有一定比例的通道发生失效时,用于计算阵列辐射方



图 5 (网络版彩图) 具有 12.5% 失效阵元的  $4 \times 16$  Q 波段 5G 大规模 MIMO 阵列的 10000 个随机失效样本 的方向图

Figure 5 (Color online) Patterns of 10000 random samples of a 4×16 Q-band 5G massive MIMO array with 12.5% failed elements. (a) E-plane pattern; (b) H-plane pattern

向图在 (θ,φ) 方向上的期望和方差的概率模型.利用这一模型,可以对失效阵列辐射方向图的一些重 要参数进行方便、快速的评估.然而,在工程应用中,往往更希望知道这些参数的数值分布及概率密 度.为此,这里仍以 4×16 大规模 MIMO 阵列为例,基于大量的随机样本,分析了其在有 12.5% 的阵 元发生部分失效时,阵列的增益、半功率波束宽度、副瓣电平等参数的概率密度分布.

图 5 为将该阵列具有 12.5% 失效阵元时的 10000 个随机失效样本用式 (1) 计算得到的方向图堆 叠在一起形成的分布区域. 从图 5 可以看出这 10000 个随机样本的方向图的分布范围. 用概率公式计 算得出的阵列增益的期望值约为 24.2 dB, 在图 5 中用方形点标出. E 面和 H 面第一副瓣电平的期望 值, 分别为 –13.44 dB 和 –12.33 dB, 在图 5 中用三角形点标出, 阵列增益和第一副瓣电平的期望值均 落在各自的分布范围内. 图 6 给出了基于这些随机样本的增益、半功率波束宽度和副瓣电平进行统计 分析得出的频率直方图.

阵列增益和第一副瓣电平的期望值落在图 6 中对应频率直方图中面积最大的小区间内.因此,从 图 6 可以看出,阵列增益和第一副瓣电平数值出现在各自期望值附近处的概率最高.数值偏离期望值 越远,则出现的概率逐渐降低.同时,这些数值的分布具有与正态分布类似的分布规律.图 6 中的频率 直方图所表达的分布规律可用于了解具有一定比例失效通道的阵列方向图主要参数的概率密度.

#### 6 结论

本文以 5G 毫米波大规模 MIMO 阵列为例, 对阵列中具有不同数量通道失效时的辐射特性进行了 计算、仿真与实验研究, 确认了用不包含互耦影响的解析公式分析大型阵列失效状态下辐射特性的可 信性. 提出了大规模 MIMO 阵列失效的概率模型, 可快速得出具有一定失效阵元占比的大规模 MIMO 阵列失效案例总体的增益、副瓣电平等方向图参数的期望与方差. 对大规模 MIMO 阵列在有阵元失 效时的辐射特性进行了统计分析. 研究结果表明, 对于同一失效占比, 用概率模型计算得出的阵列增 益、半功率波束宽度和副瓣电平等参数的期望、方差分别与基于大量样本的统计均值、统计方差高度 吻合. 所提出的概率模型可以对具有一定比例失效阵元的大规模 MIMO 阵列的增益、副瓣电平等辐 射特性进行快速评估. 通过对大量随机失效样本的统计分析, 可以看出阵列增益和第一副瓣电平数值 出现在各自期望值附近处的概率最高. 其数值偏离期望值越远, 则出现的概率逐渐降低. 同时, 这些数



图 6 (网络版彩图) 10000 个随机样本的主要辐射参数的频率直方图

Figure 6 (Color online) Frequency histogram of main radiation characteristics of 10000 random samples. (a) Gain; (b) FSLL; (c) E-plane HPBW; (d) H-plane HPBW

值的分布具有与正态分布类似的分布规律.由这些样本的统计分析得出的方向图参数的分布规律,对 了解大规模 MIMO 阵列在失效时方向图主要参数恶化程度的概率密度具有参考价值.

本文除对实际的 4×16 通道 Q 波段 5G 毫米波大规模 MIMO 阵列进行了详细研究, 还对 8×16 和 16×16 大规模 MIMO 阵列用同样的方法进行了研究, 所得结果均与上述结论吻合. 限于篇幅, Q 给出了基于 4×16 通道 Q 波段 5G 毫米波大规模 MIMO 阵列的详细研究结果. 本文的方法具有一般性, 适用于具有不同失效比例、不同失效状态混合出现的大规模 MIMO 阵列及有源相控阵的失效特性的分析. 在对阵列失效特性的分析中具有广泛的适用性、准确性与方便性.

#### 参考文献

- 1 Marzetta T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. IEEE Trans Wireless Commun, 2010, 9: 3590–3600
- 2 Larsson E G, Edfors O, Tufvesson F, et al. Massive MIMO for next generation wireless systems. IEEE Commun Mag, 2014, 52: 186–195
- 3 Ngo H Q, Larsson E G, Marzetta T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems. IEEE Trans Commun, 2013, 61: 1436–1449
- 4 You X H, Pan Z W, Gao X Q, et al. The 5G mobile communication: the development trends and its emerging key techniques. Sci Sin Inform, 2014, 5: 551–563 [尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术. 中国科学: 信息科学, 2014, 5: 551–563]
- 5 Hu H, Gao H, Li Z, et al. A Sub-6GHz Massive MIMO System for 5G New Radio. In: Proceedings of IEEE 85th Vehicular Tech Conf (VTC Spring), Sydney, 2017
- 6 Pi Z, Khan F. An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems. IEEE Commun Mag, 2011, 49: 101–107

- 7 Qiao J, Shen X, Mark J, et al. Enabling device-to-device communications in millimeter-wave 5G cellular networks. IEEE Commun Mag, 2015, 53: 209–215
- 8 Roh W, Seol J Y, Park J, et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results. IEEE Commun Mag, 2014, 52: 106–113
- 9 Rappaport T S, Sun S, Mayzus R, et al. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work! IEEE Access, 2013, 1: 335–349
- 10 Rangan S, Rappaport T S, Erkip E. Millimeter-wave cellular wireless networks: potentials and challenges. Proc IEEE, 2014, 102: 366–385
- 11 Xiao M, Mumtaz S, Huang Y, et al. Millimeter wave communications for future mobile networks. IEEE J Sel Areas Commun, 2017, 35: 1909–1935
- 12 Yu Y R, Hong W, Jiang Z H, et al. Multibeam generation and measurement of a DDS-based digital beamforming array transmitter at Ka-band. IEEE Trans Antenn Propagat, 2019, 67: 3030–3039
- 13 Yang B Q, Yu Z Q, Lan J, et al. Digital beamforming-based massive MIMO transceiver for 5G millimeter-wave communications. IEEE Trans Microwave Theor Techn, 2018, 66: 3403–3418
- 14 Kuai L, Chen J X, Jiang Z H, et al. A N260 band 64 channel millimeter wave full-digital multi-beam array for 5G massive MIMO applications. IEEE Access, 2020, 8: 47640–47653
- 15 Yang B, Yu Z Q, Dong Y Y, et al. Compact tapered slot antenna array for 5G millimeter-wave massive MIMO systems. IEEE Trans Antenn Propagat, 2017, 65: 6721–6727
- 16 Chakraborty A, Das B N, Bhattacharya A. Detection of localized array fault from near field data. In: Proceedings of Antennas and Propag Society Symposium 1991 Digest, London, 1991. 1408–1411
- 17 Patnaik A, Christodoulou C. Finding failed element positions in linear antenna arrays using neural networks.
   In: Proceeding of 2006 IEEE Antennas and Propag Society Intl Symp, Aluquerque, 2006. 1676–1678
- 18 Yeo B K, Lu Y L. Fast detection and location of failed array elements using the fast SVM algorithm. In: Proceedings of 2010 14th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics & the American Electromagnetics Conference, Ottawa, 2010
- 19 Zhao H P, Zhang Y, Li E P, et al. Diagnosis of array failure in impulsive noise environment using unsupervised support vector regression method. IEEE Trans Antenn Propagat, 2013, 61: 5508–5516
- 20 Artyushenko B. Genetic algorithm for antenna array with failed and deviated elements optimization. In: Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Techn and Applications, Dortmund, 2007. 228–231
- 21 Zhu S, Cai J Y, Han C H, et al. Influence of failed element on array antenna performance. Electron Optics Control, 2019, 26: 54–59 [朱赛, 蔡金燕, 韩春辉, 等. 失效阵元对阵列天线性能影响分析. 电光与控制, 2019, 26: 54–59]
- 22 Yeo B K, Lu Y L. Array failure correction with a genetic algorithm. IEEE Trans Antenn Propagat, 1999, 47: 823–828
- 23 Keizer W P M N. Element failure correction for a large monopulse phased array antenna with active amplitude weighting. IEEE Trans Antenn Propagat, 2007, 55: 2211–2218
- 24 Qin L L, Jiang T, Qin J H, et al. Evaluation of failed arrays pattern recovery based on genetic algorithm. In: Proceedings of International Applied Computational Electromag Society Symposium, Beijing, 2018
- 25 Cui L, Li Y A. The method research of beamforming with array-element failure. In: Proceedings of 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, Changchun, 2010. 111–114
- 26 Zhong S S. Antenna Theory and Technique. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015. 180–181 [钟顺时. 天线理论与技术. 第 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2015. 180–181]

# Analysis on the characteristic of millimeter-wave 5G massive MIMO array with failed elements

Le KUAI, Houxing ZHOU, Jixin CHEN & Wei HONG\*

School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China \* Corresponding author. E-mail: weihong@seu.edu.cn

Abstract Massive MIMO is a key enabling technology of the fifth generation communication (5G). However, the transmitting/receiving channels of the massive MIMO array may fail after long-term continuous operation. In this paper, systematic simulation and experimental studies on the radiation characteristics of arrays with different numbers of failed elements under different electrical statuses are performed. And statistical analysis is conducted based on these studies. The probabilistic model for the millimeter-wave 5G massive MIMO array is proposed. Also, the comparison between the results derived from the probabilistic model and statistical results is made to validate the correctness and effectiveness of the proposed probabilistic model. The proposed probabilistic model can be a substitute for the statistical analysis based on large numbers of samples. And it can be used for the fast evaluation of the radiation characteristics of arrays with different electrical statuses. By using this probabilistic model, the expectation and variance of main radiation characteristics of arrays with different electrical statuses is also analyzed in this paper.

Keywords 5G, massive MIMO, millimeter wave, active antenna array, failure



Le KUAI was born in Nanjing, Jiangsu, China, in 1990. He received his B.S. degree in electronic information engineering from Southeast University Chengxian College, Nanjing, China, in 2012 and the M.S. degree in microelectronics and solid state electronics from Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing, China, in 2015. He is currently pursuing a Ph.D. degree in electromagnetic field and microwave technology at Southeast University. His research in-

terest includes microwave circuits and 5th generation of mobile communication.



Houxing ZHOU received his M.S. degree in mathematics from Southwest Normal University, Chongqing, China, in 1995, and the Ph.D. degree in radio engineering from Southeast University, Nanjing, China, in 2002. Since 2002, he has been with the State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University. He is currently a professor of School of Information Science and

Engineering, Southeast University. His main research interests are in numerical algorithms in computational EM, including the fast algorithm for spatial domain dyadic Green's functions of stratified media, the multilevel fast multiple algorithm, the FFT-based fast algorithm, the IE-based domain decomposition method, the FEM-BI-based domain decomposition method, the higher order method of moments, and the parallel computation based on GPU/Multi-core-CPU platform. Besides, the full-wave simulation technology for the electromagnetic field distribution around the base-station is also one of his current interests.



Jixin CHEN was born in Jiangsu Province, China, in 1976. He received his B.S. degree in radio engineering from Southeast University, Nanjing, China, in 1998, and the M.S. and Ph.D degrees from Southeast University, Nanjing, China, in 2002 and 2006, respectively, all in electromagnetic field and microwave technique. Since 1998, he has been with the Sate Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast

University, and is currently a professor of School of Information Science and Engineering. His current research interests include microwave and millimeter-wave circuit design and MMIC design.



Wei HONG received his B.S. degree from University of Information Engineering, Zhengzhou, China, in 1982, and the M.S. and Ph.D degrees from Southeast University, Nanjing, China, in 1985 and 1988, respectively, all in radio engineering. He is currently a professor of School of Information Science and Engineering, Southeast University. He has been engaged in numerical methods for electromagnetic problems, mil-

limeter wave theory and technology, antennas, RF technology for wireless communications etc.