多频模块有源大规模 MIMO天线研究

Research on Multi-frequency Module Active Large Scale MIMO Antenna

张长青(中国移动通信集团湖南有限公司岳阳分公司,湖南 岳阳 414000)

Zhang Changqing (China Mobile Group Hunan Co., Ltd. Yueyang Branch, Yueyang 414000, China)

<u>摘 要:</u>

5G是一个多频应用场景的高传输速率和高传输数据量的移动通信系统。传统 MIMO天线,因其天线振子数较少、几何位置固定很难满足要求。多频模块有 源大规模 MIMO天线采用可插拔多频有源模块,既可以从物理上同时满足波束 赋形、空间分集和空间复用功能,还能根据具体需求采用不同频谱的有源阵列 模块适应相关应用场景,是一款专为5G标准和需求设计的多天线设备。

<u>关键词:</u>

冬频有源阵列模块;大规模 MIMO 天线;波束赋形 doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2022.10.003 文章编号:1007-3043(2022)10-0011-08 中图分类号:TN929.5

文献标识码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

5G is a mobile communication system with high transmission rate and high transmission data for multi frequency applications. Traditional MIMO antenna is difficult to adapt because of its fixed number of the antenna and the geometric position of the antenna. Multi-frequency module active large scale MIMO antenna using pluggable multi-frequency active module, it can not only meet the beamforming, spatial diversity and spatial multiplexing function from the physical, but also adopt active array modules with different spectrum to adapt to relevant application scenarios according to specific needs. It is a multi antenna equipment specially designed for 5G standards and requirements.

Keywords:

Multi-frequency active array module; Large scale MIMO antenna; Beam forming

引用格式:张长青.多频模块有源大规模 MIMO 天线研究[J]. 邮电设计技术, 2022(10): 11-18.

1 概述

5G系统面临着物联网、频谱碎片化、实时控制和 异构网络互联等应用挑战,其中物联网的万物互联和 不定时性特点,要求5G系统支持的每平方公里非同步 终端接入的密度极高;碎片化空白频带资源应用要求 5G系统具备支持旁瓣功率泄漏极小的低中高多频带 应用能力;M2M引起的实时控制,要求5G系统能够大 量频繁地使用短帧来传输控制数据;异构网络的融入 和互联,则要求5G系统具有方便灵活地分配不同子频 带网络的能力。可以看出,如此多的新的应用标准和 场景,首先就要求5G系统的基站具有接入海量、定位 精准、子带宽不定、终端与基站异步、可方便安装维护 和硬件成本低廉的基本性能,要求天线对同小区用户 分辨率较高和抗邻频干扰的能力较强,要求天线系统 能灵活适应多频点频带应用,方便天线系统户外维护 和优化。

目前大规模 MIMO 天线研究集中在振元固定、分 布式结构上,虽然振元数量高达 128 甚至更多,但固定 模式结构的天线一般只能应用于某一特定的频点或 频带,与5G 的多频共融极不相符。一般情况,大规模 MIMO 天线的覆盖区域较大,应用方式多样,面临的频 谱应用范围相对较大,数据、语音、M2M、监控等业务 同处一小区,或者共用一个基站。为了能够降低技术

收稿日期:2022-09-01

难度,方便安装、维护和优化,可适应多频带应用场 景,又能同时发挥大规模 MIMO 天线在空间复用、空间 分集和波束赋形的功能,设计了一款可面向 5G 的多频 模块式有源大规模 MIMO 天线,该天线以波束赋形模 块为基本辐射单元,单元中的振元数量视其支持的频 带而定,单元可以插拔,可针对不同的场景使用不同 频带的模块单元,可同时支持空间复用、空间分集和 波束赋形功能。

2 5G系统的频谱应用分析

对于5G系统的频谱全球至今还没有达成最终共 识,其中日本已将4.5 GHz作为5G系统研究的频谱范 围,美国和韩国也已开始研发基于28 GHz的高频5G 网络,我国运营商普遍认为5G频谱应高中低频段结合 应用,我国的专家工程技术人员则倾向于采用6 GHz 以下的碎片化窄带低频段和6 GHz以上的连续性宽带 高频段相结合的原则,并认为6 GHz以上的高频谱,因 其具有较大的连续频谱宽带、传输速率高和覆盖性能 较差的特点,可以作为频谱资源应用的主流,为高访 问量热点区提供高容量数据业务服务;6 GHz以下的 低频谱,因其多为碎片结构、频谱资源稀少、带宽较 窄、传输速率较低和传输距离较远、覆盖性能较好,可 以作为频谱资源应用的辅助,为室内数据、某些特殊 话务和M2M等可以使用碎片频谱的应用提供补充。

研究表明,传统6 GHz以下的 IMT (International Mobile Telecommunications)低频谱,具有较好的传播特性,但频谱资源稀少,带宽较窄,如我国 IMT 系统划分使用频段中的空白频谱总共有8个,且带宽在5~55 MHz,如表1所示;6 GHz以上的高频谱,传播特性具有明显的光学特征,直线传播、衰减较大、传播距离较短,但频谱资源丰富,连续带宽极大,至少有14个可用频段,如表2所示。

频段/MHz	带宽/MHz	用途	频段/MHz	带宽/MHz	用途
1 785~1 780	5	FDD	1 880~1 875	5	FDD
1 980~1 955	25	FDD	2 170~2 145	25	FDD
1 920~1 900	20	TDD	2 400~2 390	10	TDD
2 555~2 500	55	TDD	2 690~2 655	35	TDD

表1 6 GHz以下的潜在 IMT 可用频段

另外,5G系统将会是一个移动蜂窝网、移动互联 网、物联网、车联网、工业互联网等综合网络汇集的平 台,其广泛的无线接入能力可以支持人与人、人与物、

表2 6~100 GHz以上的潜在IMT可用频段

频段	带宽	用途	频段/GHz	带宽	用途
5 925~7 145 MHz	1 220 MHz	多用途	10~10.6	600 MHz	IMT候选
12.75~13.25 GHz	500 MHz	IMT候选	14.3~15	700 MHz	IMT候选
18.8~21.2 GHz	2.4 GHz	IMT候选	22.5~23.6	1.1 GHz	移动业务
24.45~27 GHz	2.55 GHz	车载雷达	27~29.5	2.5 GHz	IMT候选
43.5~47 GHz	3.5 GHz	移动业务	50.4~52.6	2.2 GHz	IMT候选
59.3~64 GHz	4.7 GHz	短路通信	71~76	5 GHz	卫星固定
81~86 GHz	5 GHz	卫星固定	92~94	2 GHz	无线定位

物与物的任意通信与交互,可以支持包括传感器、摄像头、监听器和控制器等获取的关于工业、社会和民用信息在内的所有数据的传输。因此,5G网络中不仅 会有大量的标准帧结构的语音数据流和互联网数据 流,还会存在大量的特殊短帧结构的控制数据流,存 在大量的经过专业压缩处理的专用视频、音频数据 流,以及大量的经过低功率微基站或中继站桥接路过 的数据流。

因此,为了适应不同场景的无线通信,5G系统将 会采用不同频段支持不同业务类型的无线传输方案, 从而形成空中接口无线信道的频段多样化应用。为 了应对广泛的接入需求和多样性,也为了适应热点区 域的密集性和不均性接入特点,5G网络还会逐渐降低 传统需求的无缝覆盖标准,推进以大基站为中心和微 基站补充协调的有效覆盖机制。为了提高数据传输 的速率和信令传输的可靠性,运行在新型的由大小基 站组合群覆盖的网络中的数据流与信令流采用的频 谱将是不同的,这就要求大基站的天线系统具有同时 支持多频发射的功能。

3 可插拔有源阵列模块分析

大基站天线是整个天线群体的核心,在无线方面 可以同时支持不同频谱传输,传统的MIMO天线已经 不能适用。5G系统虽然是一个需要同时支持多频谱 信道的移动通信网络,传统的振元固定分布式大规模 MIMO天线,虽然具有一定的分集增益和波束赋形能 力,但无法支持多频谱信道同时通信,也不能从物理 上同时处理好天线振子的分集增益和波束赋形。为 了更好地适应5G接入网的大基站天线群体架构模式, 大基站天线首先必须解决这2个方面的问题。为此, 本文设计了一款新型的可插拔式、可方便更换不同辐 射频率的多频模块有源大规模MIMO天线架构,该天 线架构主要由2个部分组成,一部分是可插拔、可支持



不同频谱的有源阵列模块,一部分是支撑可插拔有源

阵列模块和后续技术的底座框架,如图1所示。



根据天线理论,阵元间距是相控阵列设计的重要 参数,合理选择阵元间距可以有效地防止栅瓣进入实 空间。一般情况下阵元间距取半波长整数倍可使副 瓣更小,从而降低辐射功率泄漏,减少能量分散到无 用空间。半波天线具有较好的天线特征,垂直波瓣角 为78°,并有较小的物理尺寸。以半波天线作为阵元 的三维立体半波天线阵列,赋形波束的单向控制性很 好,波束立体角小,辐射能量集中,通过指定方位角和 下倾角就可以获得较好的定向波束。因为阵列模块 的几何尺寸受到天线架构的限制,可插拔有源阵列模 块在Y轴向一般只取2层。如图1所示,设计的低频阵 列模块可支持8个半波天线阵元,高频阵列模块可支 持32个半波天线阵元,2类阵列模块的大小一致,底座 接口相同,可以任意插在底座的任何接口上,方便用 户在底座上根据需要选择高低频模块分布插入。

工程中,半波天线阵列模块中各振元的间距多设为:X轴间距是 $\lambda/2$ 、Y轴间距是 $\lambda/4$ 、Z轴间距是 0.6λ ,也有Z轴间距为 $\lambda/2$ 。在模块的几何尺寸不变的情况下,模块支持的频率越高振元的分布数量越多,这也正好符合技术设计标准,因为信号的频率越高,辐射传输的距离越短,阵列振元越多,波束主瓣角越小,副瓣越少,主瓣能量密度越高,主瓣的辐射距离不对等的缺陷。若以低频模块主频率f=3 GHz为模块大小的设计标准,因其波长 $\lambda=10$ cm,4个阵元对应的阵列模块的宽高厚可以定义为w=7 cm、h=15 cm、d=4 cm。高频主频率f=6 GHz,波长 $\lambda=5$ cm,同样大小的阵列模块完全可以支持32个半波天线阵元。

阵列模块的功能是专门产生赋形波束,所以每个 阵列模块的阵元信号是同一用户信号,但每个阵元信 号与其前后左右上下邻居阵元相同信号的相位差,可 以通过阵元后面的相移器灵活调整,每个相同阵元信 号的强度也可以由系统根据实际需求确定,如图2所 示。所以虽然阵列模块上各阵元的位置固定不变,但 通过调节各阵元信号的强度和相位差,同样可以方便 地获得指向任意方向的赋形波束。由于是有源部件, 阵列模块除了阵列振元和标准接口外,还有射频功 放、定位处理、相幅控制,甚至可以包括射频调制等功 能单元,之所以将射频调制功能放在阵列模块中,因 为要保持每个模块与底座间的接口的标准性,即每个 模块的接口都一样,最好能将射频调制功能直接做在 模块上,虽然增加了模块硬件结构的复杂度,但可以 方便模块在安装、维护和优化时的可插拔性。



图2 四阵元阵列模块中阵元控制简图

4 阵列模块波束赋形理论分析

设观测点 $P(r, \theta, \varphi)$ 距半波天线较远,设半波天线 长为2L、波数为 $k=2\pi/\lambda$ 、幅值为 I_m 。根据电磁场理论, 当 $z\ge0$ 时,信号激励电流为 $I(z)=I_m sink(l-z)$,当z<0时, 信号电流 $I(z)=-I_m sink(l+z)$ 。当r>>L时,半波天线上 的电流元 $Idz \approx P$ 点产生的电磁场可以表示为 dE_{θ} = $j\eta_{0}Idz/(2\lambda r)\sin\theta e^{-j\kappa}$,参考图 2,对天线长 2L 积分,可得 单根半波天线的方向图函数为:

$$f(\theta) = \cos(\pi/2\cos\theta) / \sin(\theta)$$
 (1)

半波天线是一种长度为半个波长的直线天线,由 其组成的基本一维天线阵列有2种,一种是由N_x个半 波天线平行组成的平行振子阵列,一种是N_x个半波天 线共轴组成的共轴振子阵列,根据半波天线阵列方向 图乘积定理,N_x阵元平行振子阵列和N_x阵元共轴振子 阵列的方向图函数分别为:

 $f(\theta,\varphi) = [\cos(\pi/2\cos\theta)/\sin\theta] [\sin(N_x\psi_x/2)/\sin(\psi_x/2)]$ (2)

 $f(\theta) = [\cos(\pi/2\cos\theta)/\sin\theta] [\sin(N_z\psi_z/2)/\sin(\psi_z/2)] \quad (3)$

式中, $\psi_x = \alpha_x + kd_x \sin\theta \cos\varphi_v \psi_z = \alpha_z + kd_z \cos\theta$ 是相邻振 子间的总相位差。可以看出,平行振子阵列的方向图 与倾角和方位角相关,因而是定向阵列;共轴振子阵 列的方向图仅与倾角相关,因而是方位全向性阵列。

所有二维平面和三维立体半波天线阵列都是由 平行振子阵列和共轴振子阵列组成。设三维立体半 波天线阵列在X轴上的阵元数为 N_x 、Y轴上的阵元数 为 N_y 、Z轴上的阵元数为 N_z ,设X轴上相邻阵元间距为 d_x 、Y轴上相邻阵元间距为 d_y 、Z轴上相邻阵元间距为 d_z ,设X轴上相邻阵元激励电流相位差为 α_x 、Y轴上相 邻阵元激励电流相位差为 α_y 、Z轴上相邻阵元激励电 流相位差为 α_z 。根据半波天线阵列方向图乘积定理, 三维立体半波天线阵列在观测点 $P(r, \theta, \varphi)$ 处的方向 图函数为:

 $f(\theta,\varphi) = [\cos(\pi/2\cos\theta)/\sin\theta] [\sin(N_x\psi_x/2)/\sin(\psi_x/2)] \times$

 $\left[\sin(N_{y}\psi_{y}/2)/\sin(\psi_{y}/2)\right]\left[\sin(N_{z}\psi_{z}/2)/\sin(\psi_{z}/2)\right] \quad (4)$

其中: $\psi_x = \alpha_x + kd_x \sin\theta \cos\varphi$, $\psi_y = \alpha_y + kd_y \sin\theta \sin\varphi$, $\psi_z = \alpha_z + kd_z \cos\theta$ 为相邻阵元间的总相位差。

显然, $[\cos(\pi/2\cos\theta)/\sin\theta]$ 是半波天线方向图函数, $[\sin(N_{,\psi_{x}}/2)/\sin(\psi_{x}/2)]$ 是沿*X*轴的平行振子阵列 阵因子, $[\sin(N_{,\psi_{y}}/2)/\sin(\psi_{y}/2)]$ 是沿*Y*轴的平行振子 阵列阵因子, $[\sin(N_{,\psi_{x}}/2)/\sin(\psi_{y}/2)]$ 是沿*Z*轴的共轴振 子阵列阵因子。

根据图2所示阵列模块的设计要求,分别取低频f =3 GHz和高频f=6 GHz分析。设 d_x =0.5 λ , d_y =0.25 λ , d_z = 0.6 λ ,对于低频模块取 N_x =2、 N_y =2、 N_z =2,对于高频模块 取 N_x =4、 N_y =2、 N_z =4。图3所示为取 α_x =0°、 α_y =-60°、 α_z = 0°时低频8阵元模块和高频32阵元模块产生的赋形波 束,其中8阵元波束的波瓣角较大,辐射功率密度较



图3 2种阵元结构阵列模块的波束方向图

低,副瓣极小;32阵元波束的波瓣角较小,辐射功率密 度较高,副瓣相对较大。所以,低频小阵元模块虽然 辐射功率泄漏小,但波瓣角较宽,分辨率较低,有效功 率分布距离较近,好在低频信号有传播距离远的优 势;高频大阵元模块虽然副瓣较多,功率泄漏较大,但 主波瓣角较窄,分辨率较高,有效功率分布距离较远, 正好弥补高频信号传播距离较近的缺陷。

从式(4)中可以看出,三维立体半波天线阵列一 旦确定,可调参数就只有位于三轴相邻阵元激励电流 的相位差 α_x, α_y 和 α_z ,其中 α_x 主要调整波束的方位角, α_y 主要调整波束的有效传播距离, α_z 主要调整波束的 倾角,所以系统可根据应用场景通过各自的相移控制 器分别调整 α_x, α_y 和 α_z ,确定阵列模块辐射波束的方向 定位和强度。图4所示为在上述基本条件下,低频8 阵元和高频32阵元阵列模块的相邻阵元间相位差 $\alpha_x,$ α_z 与波束方向的关系曲线,其中"o"和"*"是式(4)的模 拟数据,实线和虚线是与这些数据对应的直线,可以 看出,相邻阵元相位差 α_x, α_z 与波束方向的关系呈高度 近似线性,系统通过相关测量获得观察点的波达方向 数据后,就可以简单地获得 α_x, α_z 的调整数据。

对于低频8阵元模块,先分析X轴相邻阵元相位 $ź \alpha_x$ 与波束方位角 φ 的关系。根据图4(a)中的数据,



图4 阵元间相位差α,、α,与波束方向的关系

取 X 轴相邻阵元间的最小相位差 α_{xmin} =-200,产生的波 束方位角 φ_{min} =20°, X 轴相邻阵元间的最大相位差 α_{xmax} =200,产生的波束方位角 φ_{max} =160°,则任意 X 轴相邻阵 元间的相位差 α_x 与产生的波束方位角 φ 的线性关系可 表示为:

$$\alpha_{x} = -200 + (\varphi - 20) \times 7/20 \tag{5}$$

再分析 Z 轴相邻阵元间的相位差 α_2 与波束倾角 θ 的关系。根据图 4(b)中的数据,取 Z 轴相邻阵元间的 最小相位差 α_{min} =-200,产生的波束倾角 θ_{min} =52,Z 轴 相邻阵元间的最大相位差 α_{max} =200,产生的波束倾角 的最大值为 θ_{max} =128,则任意 Z 轴相邻阵元间的相位差 α_2 与产生的波束倾角 θ 的线性关系可表示为:

$$\alpha_{=}=-200+(\theta_{-}52)\times 200/38 \tag{6}$$

对于高频 32 阵元阵列模块,先分析 X 轴相邻阵元 间的相位差 α_x 与波束方位角 φ 的关系。根据图 4(a)中 的数据,取 X 轴相邻阵元间的最小相位差 α_{xmin} =-200, 产生的波束方位角 φ_{min} =10°, X 轴相邻阵元间的最大相 位差 α_{xmax} =200,产生的波束方位角 φ_{max} =170°,则任意 X 轴相邻阵元间的相位差 α_x 与产生的波束方位角 φ 的线 性关系可表示为:

$$\alpha_r = -200 + (\varphi - 10) \times 5/2$$
 (7)

再分析 Z 轴相邻阵元相位差 α_z 与波束倾角 θ 的关系。根据图 4(b)中的数据,取 Z 轴相邻阵元间的最小相位差 α_{min} =-200,产生的波束倾角 θ_{min} =39°,Z 轴相邻 阵元间最大相位差为 α_{max} =200,产生的波束倾角最大 值为 θ_{max} =141°,则任意 Z 轴相邻阵元间的相位差 α_z 与 产生的波束倾角 θ 的线性关系可表示为:

$$\alpha_{z} = -200 + (\theta - 39) \times 400/102$$
 (8)

可以看出,阵列模块的倾角θ与相邻阵元间的相 位差α₂的模拟数据与真线非常吻合,但方位角φ与相 位差α_x的模拟数据与真线存在一些误差,特别是高频 模块的误差较明显,见图4(a)中"*"点与虚线的关系。

由于式(5)~(8)都是简单的线性方式,所以图2中 的"相移控制"电路非常简单,一定程度上降低了模块 设计的技术难度。图5所示就是利用式(4)~(8),在已 知观察点波达方向的方位角和倾角后,用高频32阵元 模块模拟出的赋形波束。给出测量值θ=120°、φ=60° 和θ=70°、φ=120°,前者观察点在坐标系的左下方(见 图5(a)),后者观察点在坐标系右上方(见图5(b))。 图5所示的模拟辐射波束主瓣的倾角非常准确,方位 角有少许偏差。图5还给出了另一个值得关注的特 点,即相控波束的方位角φ和倾角θ与阵元间相位差



图5 相移控制模拟图

 $\alpha_x, \alpha_z \pi \alpha_y$ 的关系,既是线性关系,又是独立关系,实际 上是一种线性叠加关系。

众所周知,阵列形成的波束包括主瓣和副瓣。一般情况下,主瓣远远大于副瓣,有的副瓣甚至可以忽略不计,如图3中的低频8阵元波束,有的副瓣甚至可以之于主瓣,特别是方位角或下倾角较大时产生的副瓣。副瓣的存在是辐射功率泄漏和产生邻频干扰的主要原因,所以副瓣越小越好。图6所示是阵列模块的阵元间的相位差 α_x、α_y、α_z与辐射波束主瓣强度最大值的关系曲线,其中主瓣波束强度变小时,说明副瓣功率泄漏较大,或者副瓣较大。若取每个阵元的辐射强度为单位1,则8阵元阵列的平均强度为8,32阵元阵列的平均强度为32,阵元越多辐射波束主瓣的强度随阵元相位的变化也越大,不同阵元间相位差产生的影响也完全不同。

虽然阵元间相位差 α_x 、 α_z 在调整方位角、倾角时彼此独立,互不影响,但可以影响波束的强度分布,即在分别调整 α_x 、 α_z 时,波束的波瓣角有变化,若以Y轴参考,方位角和倾角的绝对值越大,波束的功率密度越高,能量传播的距离越远,副瓣也越小。图6(a)曲线说明 α_x 取值在-150° << α_x <150°时的波束强度或形状的



图6 阵元间相位差与波束强度的关系

变化不大,图6(b)曲线说明 α_y 取值在±60°~±120°时的 波東强度或形状分布较好,图6(c)曲线说明 α_x 取值 在-100°≤ α_x ≤100°范围内时的波束强度或形状也不错。 根据图4中的曲线, α_x 和 α_x 的值越大,则赋形波束的方 位角和倾角也越大。所以,图2中的"相移控制"电路 既要参考方位角和下倾角测量值,也要参考 α_x 、 α_y 和 α_x 的取值范围。

5 多频模块有源大规模 MIMO 天线分析

多频模块有源大规模 MIMO 天线的最大特点是多 频模块的多频、标准和专用等应用。该天线系统可以 根据现场场景适度调整使用低频模块或高频模块。 对于 MIMO 天线主体,阵列模块只是用户信号的辐射 单元,因为每个阵列模块中的所有阵元上的激励电流 调制的都是同一信号,每个阵列模块只对同一信号生 成波束赋形。由于阵列模块是用户信号辐射的单元, 系统可以在模块之间完成空间复用或空间分集功能, 所以当系统采用编码技术获取空间复用或空间分集 增益时,每个阵列模块中的所有阵元上都是同一个编 码。由于这些空间增益编码只对空间复用或空间分 集有用,所以每个阵列模块执行的波束赋形功能与各 阵列模块间执行的空间复用和空间分集功能,理论上 是没有任何关联的,也不存在相互影响,这3个基本功 能可以同时在 MIMO 天线中实现,如图7所示。



图7 大规模 MIMO 天线波束赋形、空间复用和空间分集示意

图 8 所示为多频模块有源大规模 MIMO 天线结构,天线中的阵列模块单元有低频模块和高频模块。 虽然每个阵列模块是三维立体阵列,但 MIMO 天线的 辐射单元结构是二维平面式。设 MIMO 天线阵列模块 单元 X 轴间距为A, Z 轴间距为C, X 轴有 N 个单元, Z 轴 有 M 个单元。设阵列模块单元由 $n \times m \times q$ 个阵元振子 组成, X 轴阵元间距为 a, Y 轴阵元间距为 b, Z 轴阵元间 距为 c, X 轴有 n 个阵元, Y 轴有 m 个阵元, Z 轴有 q 个阵 元。设有移动终端位于 MIMO 天线正面 $P(R, \theta, \varphi)$ 处, 其中 R、 θ 、 φ 分别为 P点的球坐标, 若以 Y 轴为 MIMO 天





线平面法线,则 θ 是辐射单元的倾角, φ 是辐射单元的 方位角,R为MIMO天线中心坐标原点至P点的距离。 据此可以研究MIMO天线中某个辐射单元中的阵元振 子d(i,j,k)对 $P(R,\theta,\varphi)$ 处终端的波束赋形。

设图 8 所示的多频模块大规模 MIMO 天线架构中的辐射单元数分为 N=2、M=4,其中低频阵列模块中的阵元数分别为 n=2、m=2、q=2,高频阵列模块中的阵元数分别为 n=4、m=2、q=4,低频波长 $\lambda=10$ cm,高频波长 $\lambda=5$ cm,为保证阵元的相干性,每个模块阵元的间距分别为 $a=\lambda/2$ 、 $b=\lambda/4$ 、 $c=0.6\lambda$ 。为了保证各阵列模块间的无关性,所有辐射单元的间距取 $A=B=10.25\lambda$ 。设位于有源大规模 MIMO 天线前面的 UE1 的方位角 $\varphi_0=60^\circ$ 、下倾角 $\theta_0=130^\circ$,接收的信号来自第 2 个低频阵列模块。设位于有源大规模 MIMO 天线前面的 UE2 的方位角 $\varphi_0=120^\circ$ 、下倾角 $\theta_0=110^\circ$,接收的信号来自第 7 个高频阵列模块。利用 Matlab 和式(4)进行仿真,可分别模拟出这 2 个用户在同一 MIMO 天线下由低高频阵列模块发射的赋形波束,如图 9 所示。



图9 低高频阵列模块产生的归一化赋形波束

有源阵列模块是有源大规模 MIMO 天线实现波束 赋形的专用单元,天线振子布局可以是二维阵列,也 可以是三维阵列,为了使波束赋形具有一定的独立 性,也为了提高波束赋形的快速反应,将包括辐射功 放、耦合振荡、相控阵元和插拔接口等电路元器件,甚 至是波束赋形算法芯片都直接集成到阵列模块上,使 其成为方便扩容、维护和优化的独立可插拔器件。也 就是说,波束赋形的功能完全可以由有源阵列模块独 立执行,天线系统只需为其提供目标终端的波达方向 参数即可。由于有源阵列模块中阵元的几何位置可 以按照波束赋形的理论定位,无需采用预编码和其他 补偿技术,又由于基于波束赋形的阵元权值算法比较 简单,可以固化集成,既可降低模块的技术难度,又可 减少消耗系统资源的软件操作,所以有源阵列模块可 以快速执行波束赋形功能。

有源大规模 MIMO 天线在执行空间复用和空间分 集功能时,是以有源阵列模块为辐射单元进行的,可 以将有源大规模 MIMO 天线等效为传统 MIMO 天线, 使得有源大规模 MIMO 天线等效为传统 MIMO 天线, 使得有源大规模 MIMO 天线在执行空间复用和空间分 集功能时,借鉴、参考甚至是照搬部分传统 MIMO 天线 的成熟技术。由于有源阵列模块被设计为一种对其 他功能没有任何影响的可独立执行波束赋形功能的 可插拔器件,各模块在空间上具有不相干性,保证各 自发射信道是具有独立衰落的不相关信道,非常方便 运营商根据热点小区或密集小区的业务需求,随时随 地灵活增加或减少有源阵列模块,调整 MIMO 天线的 空间复用和空间分集应用,满足数据业务的通信要 求。更可以方便更换不同频谱工作的有源阵列模块, 以适应 5G 环境下不同应用场景中不同终端设备的应 用频率。

6 多频模块间相干性分析与设计

面向5G的MIMO天线需要支持5G的多频传输特征,这些传输频率可以被分为高低频谱2个部分,其中高频频谱主要传输业务数据,低频频谱主要传输信令信息和以及万物互联中的短帧控制信令与专业数据等。因此,多频模块实际上也可分为高低频谱2类,且工作在完全不同的领域。根据表1和表2可知,这两大部分频谱的差距较大,5G可用的低频谱大多为传统的、碎片化的、且频带有限的、被应用后多余出来的无用小频段,5G可用的高频谱多为连续的、带宽较大的、免费或少量费用的毫米波段频谱。

取表2中带宽为1.22 GHz的高频段5925~7145 MHz作为高频模块所选频点,取6 GHz为高频主频率。 将表1中8个频段作为低频模块所选频点,分别取频 段中值1783、1878、1910、1968、2158、2395、2528、 2673 MHz为低频主频率。分析8个低频率与高频率 的相关系数,了解高低模块支持的频谱的相互性。相 关系数是描述相关性一个量性比率,一般只取小数点 后2位,其中的正负号表示相关方向,绝对值表示相关 程度,但相关程度不是线性等量单位,不能用具体数 值表示具体相关性,通常将2个信号的相关性划分为4 个等级,如表3所示。

表3 2个信号相关程度描述

相关系数	相关程度	相关系数	相关程度
0.00~±0.30	微相关	±0.50~±0.80	显著相关
±0.30~±0.50	实相关	±0.80~±1.00	高度相关

图10所示为6 GHz高频模块与8个低频模块,当 两者同为谐波时,高低频率载波之间的相关性描述 点。从图10可以看出,所有低频载波与6 GHz之间的 相关性都远小于0.30,所以从频率选择方面,这高低频 模块是不相关的。所以对高低频模块的主要影响是 同频干扰,也就是高频模块对高频模块的干扰和低频 模块对低频模块的干扰。而同频干扰主要取决于模 块生成的波束赋形效果和模块之间的距离。



图10 高频信号与低频信号的相关性

在多频模块中,相对于MIMO天线来讲,每个专用 模块的具体职能是完成同一个信号的波束赋形功能。 模块由阵元和与其集成专门控制阵元相位和幅度的 控制元器件组成,除了技术成熟的相控元件,模块中 各阵元间的相干性或相关性是模块设计的技术重点。 首先,各阵元发射的信号是同一信号,但各阵元信号 的相位和振幅不同,由相控元、权值元控制每个阵元。 其次,模块中的阵元阵列多为三维,每个模块的最小 阵列是2×2×2,最大阵列可根据具体设计标准而定,一般来讲,半波天线阵元间距的最大取值一般为0.6λ~ 0.8λ,最小值为λ/4~λ/2,尽量取相关性距离,并在每个 模块底和四侧加上屏幕层,使每个模块产生的波束赋 形效果达到最佳状态。

相对于MIMO天线阵列中的空间分集和空间复用 功能应用,系统将根据用户的多少确定由多少模块组 合分配,每组模块由系统根据多天线编码(如空时块 码STBC),对不同模块上的信号采用不同编码(单个模 块中所有阵元上的信号和编码相同),从而实现多模 块发送信号的空间分集和空间复用的增益效果。相 对于多模块实现空间分集和空间复用功能,各模块间 的非相干性或无关性是 MIMO天线的设计重点。首 先,各模块间的设计只需采用二维排列方式,既可降 低多模块间架构的复杂度,又可降低 MIMO天线架构 的厚度。其次,所有模块间距都应在10.2λ 左右,尽量 取无关性距离。最后,高低频模块布局间隔排列,如 图11 所示,不仅可以拉开同频模块间的有效距离A 与 *C*,还方便不同模块在 MIMO天线底盘上的架构布局。



图11 MIMO天线的多频模块位置

7 结束语

任何阵列都会产生副瓣,一维平行振子阵列的主 副瓣分别位于阵列前后,大小相同;二维平面半波天 线阵列的主副瓣与平行振子阵列相似,仅仅水平波瓣 角和垂直波束角较小;三维立体半波天线阵列通过改 变α,值,利用前后振子发射的电磁波在Y轴方向的相 干性,将副瓣能量尽可能多地转移到主瓣,使主瓣的 辐射功率密度更大,波束更窄,使有限的信号辐射功 率能够传播得更远、更准确。因受厚度限制,低频阵 列模块的Y轴上只能分布2个阵元,高频阵列模块最 多只能有4个阵元,所以α,的调整能力非常有限。由 于副瓣一般与主瓣反向分布,为了防止或降低副瓣对 相邻模块的干扰,设计时,把每个模块除正面外的其他5面涂上吸波材料或加上反射罩,也可以使阵元稍微陷入模块中,如图1(e)所示,使其可以达到有效约束副瓣产生不良影响的目的。

由于阵元相邻相位差的调整也可以影响辐射波 束的强度和形状,图2中的"幅度控制"只需对整个模 块操作,当然可以将幅度控制与每个阵元的加权电路 相结合,既可以简化部件,又可以全面修正波束赋形。 理论上,电磁场在自由空间的分布是弥散性的充满整 个可以到达的地方,仅仅只是电磁场分布的强度、方 向不同。波束成形技术可以人为地根据自己的需要 改变电磁场的分布形状,使辐射电磁场的主要能量可 以分布在一个较窄的指定区域,通过提高辐射电磁场 在指定区域的功率密度和定向传播,可以有效地降低 辐射信号对非指定区域信号的干扰,利用辐射波束的 高能量密度和较低的辐射功率传播信号,提高无线信 道传输质量。通过更换不同频谱的有源阵列模块,可 以使阵列模块的波束赋形达到最佳,能够极大地适应 不同应用场景的需要。

检测移动终端的波达方向的技术是一项已在3G、 4G通信广泛应用的成熟技术。波达方向的方位角φ 和倾角θ与阵元间相位差α_x和α_z呈线性关系,阵列模 块相控电路相对简单,这为模块中增加本地载波调 制、射频功放等功能提供了可能,从而降低了多频有 源阵列模块的技术难度,也方便了多频有源阵列模块 对多频场景的应用。

参考文献:

- [1] 张长青,面向5G的大规模 MIMO技术研究[J]. 邮电设计技术, 2016(3):34-39.
- [2] 阵鹏,刘洋.5G关键技术与系统演进[M].北京:机械工业出版 社,2016.
- [3] 张长青,智能天线在TD-LTE中的应用分析[J].移动通信,2012 (24):49-54.
- [4] 王映民,孙韶辉. TD-LTE Advanced 移动通信系统设计[M]. 北京:人民邮电出版社,2012.

作者简介:

张长青,毕业于中科院长春物理研究所,高级工程 师,硕士,主要从事计算机网络和移动通信技术相 关工作。

