

# 5G 终端天线结构设计综述

赵张源, 朱灿焰

(苏州大学 轨道交通学院, 江苏 苏州 215000)

**摘要:** 主要介绍 5G 天线的现状, 展示了近十年来几种主流的智能终端天线的设计方式, 以 MIMO 天线、频率可重置天线和缝隙天线为主, 阐述了它们的工作模式、原理和相应优缺点, 并对天线设计中去耦合和带宽拓展两个重要技术做了详细介绍, 最后对未来 5G 天线的发展趋势和可能改进进行了展望。

**关键词:** 5G; MIMO 天线; 缝隙天线; 频率可重置天线; 去耦合; 带宽拓展

中图分类号: TN817

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200783

中文引用格式: 赵张源, 朱灿焰. 5G 终端天线结构设计综述[J]. 电子技术应用, 2021, 47(2): 7-10, 15.

英文引用格式: Zhao Zhangyuan, Zhu Canyon. Overview of 5G terminal antenna structure design[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(2): 7-10, 15.

## Overview of 5G terminal antenna structure design

Zhao Zhangyuan, Zhu Canyon

(School of Rail Transportation, Soochow University, Suzhou 215000, China)

**Abstract:** This article mainly introduces the current status of 5G antennas, and shows several mainstream smart terminal antenna design methods in the past decade. Based on MIMO antenna, frequency resettable antenna and slot antenna, their working modes, principles and corresponding advantages and disadvantages are explained, and two important technologies of antenna decoupling and bandwidth expansion are introduced in detail. Finally, the future development trends and possible improvements of 5G antennas are prospected.

**Key words:** 5G; MIMO antenna; slot antenna; frequency resettable antenna; decoupling; bandwidth expansion

### 0 引言

面向 2020 年及未来, 移动通信技术和产业将迈入第五代移动通信(5G)的发展阶段。5G 能够满足人们超高质量密度、超高移动性的需求, 为用户提供高清视频、虚拟现实、增强现实、云桌面、在线游戏等极致业务, 还将渗透到物联网等领域, 与工业设施、医疗仪器、交通工具等深度融合, 全面实现“万物互联”, 有效满足工业、医疗、交通等垂直行业的信息化服务需要。5G 天线则是实现以上这些愿景至关重要的系统部件之一。

面对信息的快速增长, 通信能力不足的弊端日益明显, 多频带双极化天线成为一种主流选择, 近来, 具有堆叠贴片的紧凑尺寸双极化天线通过多模操作来提供双传输通道变得非常流行<sup>[1]</sup>, 但是由于存储空间的狭小, 这些天线往往隔离较差并且增益较低, 这也是要着重解决的难题。与传统天线相比, 可重构天线具有简化、小型化等许多优势, 可以改变方向图、频率和极化性能, 因此, 非线性设备也被广泛用于无线通信系统中, 在这种情况下, 天线如果没有谐波抑制能力, 就会出现电磁兼容性问题<sup>[2]</sup>; 而且, 为了进一步提高能量转换的效率, 抑

制谐波是必不可少的。在传统的系统设计中, 通常会采用大容量、高成本和插入损耗滤波器来抑制谐波, 但这又会影响系统的阻抗匹配, 所以天线设计中也要注意这两者的平衡。另一方面, 尽管许多天线设计旨在达到尽可能大的工作带宽, 然而由于各种通信系统的共存, 在实现抗干扰传输的同时满足超宽带设计也很具有挑战性。

在 4G 系统中, MIMO 技术已经获得较为广泛的应用, 面对 5G 在传输速率和系统容量等方面的性能挑战, 天线数目的进一步增加仍将是 MIMO 技术继续演进的重要方向。同时, 正如上文所提到, 许多其他设计方案也在 5G 智能终端的需求上显示出很好的应用前景, 其中最有代表性的便是 MIMO 天线、频率可重置天线和缝隙天线。

本文就 5G 天线的研究现状做了介绍, 展示了 MIMO 天线、频率可重置天线及其他常见天线的设计, 对天线设计中去耦合技术及带宽拓展技术作了阐述。

### 1 MIMO 天线相关设计

#### 1.1 正交与中和线在 MIMO 天线设计中的应用

MIMO 技术通过在发送端和接收端使用多个天线单元, 极大地提高信道容量和频谱利用率, 从而实现天线

系统的高可靠性和有效性,是当前 5G 天线设计的热门技术。许多设计者在 5G 智能终端的设计上对 MIMO 技术的应用做出尝试,由于智能终端的小型化结构,天线元件间距离过小容易导致耦合,使得天线的正交放置和中和线的应用成为大多数研究人员最热衷的方式。ABDULLAH M 提出的 3.5 GHz 紧凑型四端口 MIMO 天线系统就将两个 L 型单极辐射器彼此正交放置,很好地获得了移动手机天线结构非接地部分边缘的极化和图形分集能力<sup>[3]</sup>;文献[4]在相邻两个天线之间采用正交摆放的短 T 型接地直接去耦。如图 1 所示,这种短枝节实质是寄生单极子单元,可以通过寄生耦合效应抵消激励的地板耦合电流。同样在之前所提到的四端口 MIMO 天线系统也采用了从地面延伸的寄生短路条纹,它可以有效降低 L 型单极天线的谐振频率。

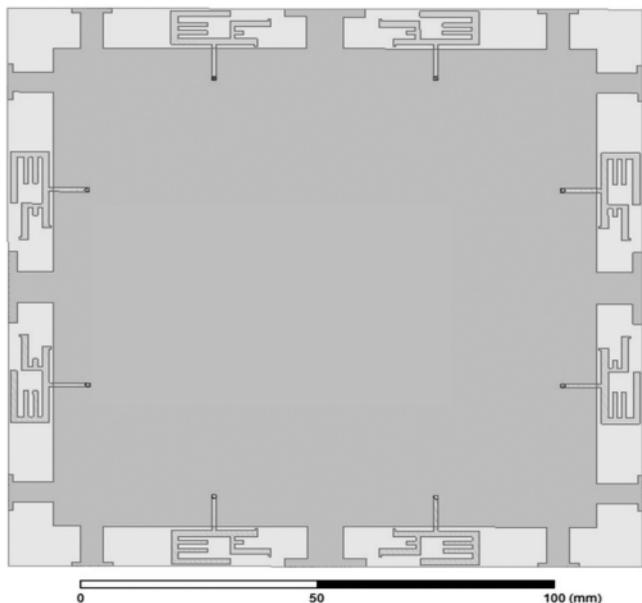


图 1 采用寄生短路条纹去耦的天线阵列结构俯视图

中和线也是 MIMO 技术中常用到的去耦技术。它相当于带阻滤波器的替代,线的长度指定其电感,宽度指定其电容,用来减少不同数量的天线元件之间的相互耦合。在前文所提到的四端口 MIMO 中,在天线激励后,中和线上的电流和相邻天线上的电流具有相同的幅度和 180°的相位差,从而对天线间的耦合起到限制作用。文献[5]提出的具有机械可控主波束的 5G 小型蜂窝高增益 MIMO 偶极天线采用两个弯曲的哑铃形偶极子,它们以反对称结构排列。通过连接到寄生贴片两个中心边缘的一对条带进行优化去耦,使用短截线实现了高隔离度。

### 1.2 采用多种馈电方式设计 MIMO 天线

对一个天线系统采用不同种类的馈电方式往往能得到很好的效果。文献[6]设计的高度集成的 MIMO 单元采用了 IEOMA 天线,该天线由一个差分模式天线和一个偶数模式天线组成,偶数模式天线是由微带线馈电的

印刷偶极子,而奇数模式的天线是由同轴电缆馈电的印刷偶极子。偶极子在两个端口馈入具有相等幅度和 180°相位差的输入信号,通过差分 and 偶数模式的组合来实现较宽的覆盖范围。

### 1.3 双频及多频 MIMO 天线的设计

在实际应用中,经常会有区别于传统微带天线的双面印刷天线,一般具有两个不同的天线结构,分别在介质基板的两个面上,再通过侧框架与系统地平面正交以实现馈电。通过这种方法,很容易实现双频乃至多频。图 2 中双频 MIMO 天线采用的就是这种设计方法,前辐射部分采用弯曲线单极,后辐射部分采用 L 型短路截线,它产生的耦合电容有助于匹配低频带的阻抗,使整个天线结构能够更好地覆盖低频部分,并利用 50 Ω 同轴线对天线系统进行馈电<sup>[7]</sup>;文献[8]的八天线阵列也是采用类似的方式实现阻抗匹配和双频段。

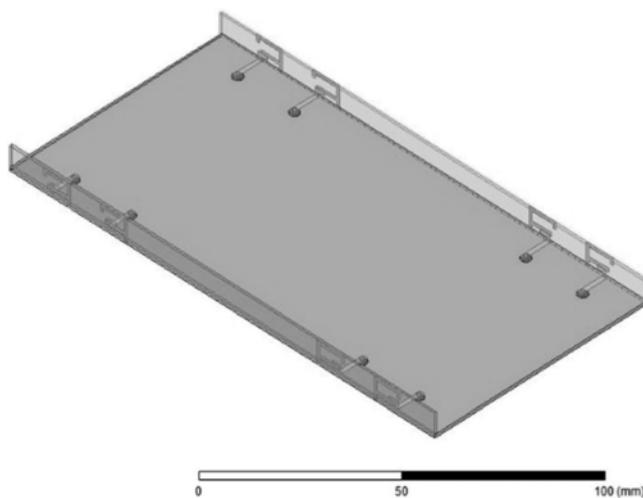


图 2 采用同轴线馈电的双频 MIMO 天线透视图

## 2 频率可重置天线相关设计

### 2.1 频率可重置天线简介

频率可重构天线通过加载一个或多个可控制器件改变天线的结构,使天线的工作频段在一定范围内重构,而其他参数基本保持不变,同时使天线具有多频段、超宽带的性能,还能够有效避免自身和外界带来的电磁干扰,适应新的环境,确保通信的总体稳定性,因此近年来,国内外对频率可重置天线进行了不少研究。

### 2.2 频率可重置天线的应用

由 PANT A 设计的用于 4G 和 Pre-5G 技术的频率可重配置移动手机天线就是它的典型代表。天线采用放置在电路板顶角的两个不对称偶极辐射器,分别对应于相应的工作频率,两个偶极辐射器通过微带线馈电,该微带线又在一端由 SMA 同轴线馈电。为了使天线可重新配置,采用了使用 PIN 二极管的电子开关技术,将两个 PIN 二极管通过微带线连接在两个偶极辐射器的馈电点上<sup>[9]</sup>。同时,为了保持射频电源和直流偏置之间

的适当隔离,板上还安装了一些电感器和芯片电容器来充当偏置网络。这样,选择性地控制在辐射器元件上的表面电流,就能使天线在两个谐振模式之间调谐;文献[10]提出的可重构插槽天线采用两个PIN二极管用于实现天线的多频带,分别设置在系统电路板上和折叠槽中,通过这两个二极管的三种开关组合方式实现三个不同的形式;文献[2]中具有谐波抑制功能的双极化频率可重构低剖面天线用一对 $\pm 45^\circ$ 极化频率可配置偶极天线,两个带有滤波分支的垂直放置的馈电结构以及一个人工磁导体(AMC)表面。通过引入U形结构在两个频带中实现更好的阻抗匹配性能。通过控制PIN二极管的开关,使天线可以在不同频段下工作,并且两个频带的端口隔离度大于25 dB。此外,通过加载滤波分支能够实现两倍频程谐波抑制。

### 3 其他常见天线及相关设计

#### 3.1 介质谐振器天线

介质谐振器是近年来发展起来的一种新型的谐振器,是一类用低损耗、高介电常数材料(如钛酸钡和二氧化钛等)制成的谐振器,通常有矩形、圆柱形和圆环形。介质谐振器可看作两端开路的介质波导,振荡模式与介质波导中的模式相对应,有无穷多种。介质与空气交界面呈开路状态,电磁波在介质内部反射能量,在介质中形成谐振结构。高介电常数介质能保证大部分场都在谐振器内,不易辐射或泄漏。谐振频率由振荡模式、谐振器所用的材料及尺寸等因素决定。文献[11]提出的石墨烯薄膜微带馈电矩形介质谐振器天线就很好地运用了这项技术,如图3所示,将矩形DRA放置在介质基板的偏移锥形微带线上,改变其重合部分的宽度,共振频率则随之改变;文献[12]设计的双频矩形介质谐振天线阵列采用两个陶瓷DRA和一个FR4基板,通过带有耦合槽的接地层以及微带Wilkinson功率分配器进行馈电。该设计与传统的单个DRA相比,阵列的增益可以得到一定幅度的提高,天线方向性也会有所增强。

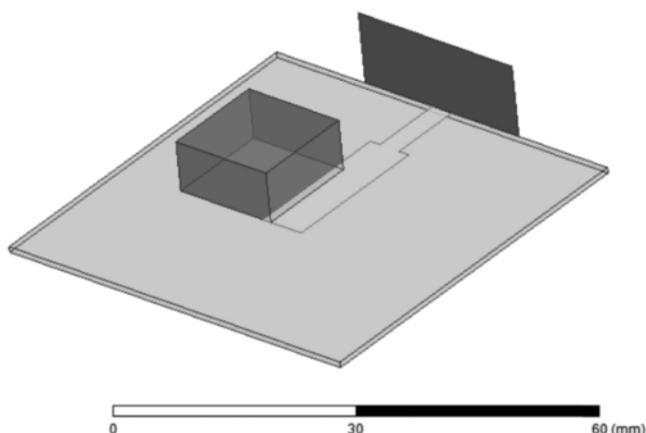


图3 矩形介质谐振器天线模型图

#### 3.2 缝隙天线

近年来,平板缝隙天线因其低剖面、可集成化、容易组阵等优点,受到了人们广泛关注与研究。缝隙天线是在波导、金属板、同轴线或谐振腔上开缝隙,电磁波通过缝隙向外部空间辐射的天线。其特点是重量轻,具有良好的平面结构,易于与安装物体共形。缝隙阵列天线的口径面幅度分布容易控制,口径面利用率高,可以实现低副瓣或极低副瓣。同时,缝隙天线还具有结构牢固、简单紧凑、易于加工、馈电方便、架设简单等优势。由IOANNIS G提出的超宽带时隙天线设计就是一个典型例子<sup>[13]</sup>。如图4所示,它采用共面波导CPW馈电方式,天线的所有金属部分都印刷在电介质基板的同一侧,与传统的印刷和微带天线相比,改变缝隙天线的操作特征的是槽的存在,其允许天线在天线平面的前面和后面的两个半空间内有效地辐射,以这种方式确保将接近全向辐射功率的辐射功率的分布,而高水平的增益和效率是通过终端贴片和共面地平面之间产生的槽进行适当的纹理化来实现的;文献[14]提出的超宽带8端口MIMO天线阵列采用接地平面上的U型槽和开放式短线组成金属框架上的插槽;文献[15]是在双极化缝隙天线的配置一个由矩形微带线馈电的紧凑型方环缝隙天线。另外,在环形槽上采用了一对圆环/不规则末端的寄生结构,以减小两个微带线馈电端口之间的相互耦合;由PARCHIN N O提出的用于5G智能手机应用的使用小型化自互补结构的双极化MIMO天线阵列设计是采用瓣环贴片和位于基板顶层和底层的缝隙结构,天线由两个独立的耦合馈电结构馈电,该设计的馈电结构连接到50  $\Omega$ 同轴探头馈电的内部导体,采用贴片辐射体的互补槽结构,不仅可以改善阻抗匹配,还可以提供对称的辐射图来覆盖PCB的顶部和底部<sup>[16]</sup>。

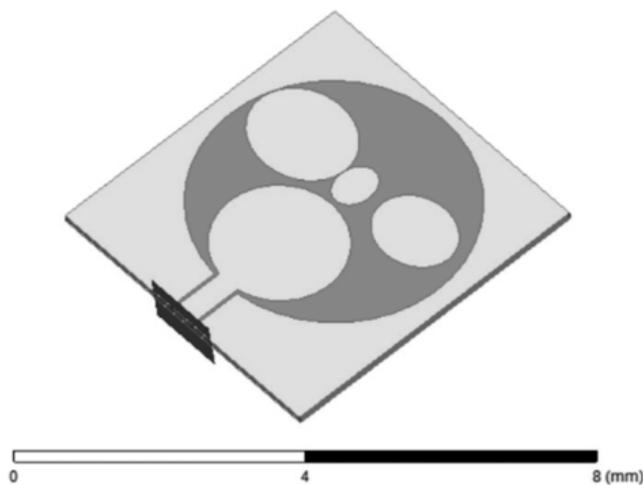


图4 采用CPW馈电的缝隙天线透视图

### 4 天线去耦合设计

#### 4.1 天线去耦合简介

在5G天线蓬勃发展的今天,更高的传输速率和更

大的工作带宽不可避免地导致天线阵列单元间的耦合,耦合过度对于天线系统的传输和接收效率会产生很大影响。最近几年天线解耦设计大概有如下几种方案:采用中和线和去耦网络,这些去耦网络或中和线被设计在天线之间用来减少耦合;采用接地平面修改设计,通过在接地平面上切槽来实现高度隔离;采用基于特征模式的设计,例如采用正交辐射图去实现隔离;采用基于寄生元素的设计,设计由多个小金属片组成的表面可以减少天线元件之间的相互耦合。

#### 4.2 去耦合应用

文献[17]设计的 MIMO 系统贴片天线的增强匹配和无孔解耦是天线去耦合的一个成功应用。所提出的多功能无孔结构仅包括连接到馈电线的两个狭窄的 T 形桩,在它们之间安装一个狭窄的矩形桩以及在接地平面上一个狭窄的矩形槽。该设计简单紧凑,相互耦合性低,成本低并且对辐射和共振没有不利影响;文献[18]提出的紧凑型超表面天线阵列去耦设计采用元表面天线阵列去耦(MAAD)的方法,以超覆盖和超接地的形式分别将亚波长谐振器放置在天线阵列的上方和下方,通过适当调整亚波长谐振器的工作频率,天线阵列与超表面之间的距离以及每个天线阵列元件的自匹配,可以显著减少天线中各元件之间的相互耦合;文献[1]提出的具有高隔离度和带陷波特性的双频段双极化堆叠式微带天线不仅在两个端口有很高的隔离度,还有可调节的带隙特性。天线元件由三层基板组成,印刷在第一层和第二层基板上的是两个分开的辐射结构,第一层和第二层基板之间存在一定厚度的气隙,由于有效电气长度的进一步增加,有助于改善阻抗带宽。此外,通过调节间隙宽度,可以实现两层基板之间的适当耦合;文献[19]利用分形解耦结构增强宽带车载天线阵列的隔离度将 PIFA 天线元件面对面放置,去耦结构(DS)由非分形单元槽组成,并在元件之间插入一条窄线槽以减少相互耦合。

### 5 带宽拓展技术

#### 5.1 带宽拓展介绍

超宽带(UWB)定向天线的特点是安全性高,效率高,发射功率低和数据速率高,它们还具有紧凑和低功耗的优点,因此,人们对 UWB 定向天线给予了更多关注。这种天线在许多应用中起着重要作用,例如点对点通信、军事服务、无线人体局域网(WBAN)和微波成像,预计今后也会形成关于它的 5G 系统。

#### 5.2 带宽拓展应用

领结天线是一种平面天线,具有许多优点,例如体积小、重量轻、成本低、带宽大以及全向辐射方向图,是 UWB 无线系统的理想选择。文献[20]设计的基于带宽增强共振的反射器的薄型宽带单向天线就是采用的这种形式。将平面蝴蝶结天线用作辐射元件,领结天线由两个对称的水滴形贴片组成,水滴形贴片的光滑结构有

助于平滑表面电流并确保良好的阻抗匹配。图 5 中 CHEN Y 提出的 UWB 倒 F 天线中,通过侧向耦合馈入的倒 F 天线会产生三种谐振模式,再适当地调整沿 X 轴方向的曲折馈电线的长度,三个谐振点可以彼此靠近,从而获得宽带<sup>[21]</sup>。由 ZHAO A 等人设计的基于耦合环路天线的宽带 MIMO 系统采用的是耦合环路的方法来实现支持环形天线的三种谐振模式,为了使工作频段覆盖高频带,在折叠天线的中心采用短截线使得第三种模式向第二种模式移动,从而扩展了带宽<sup>[22]</sup>。

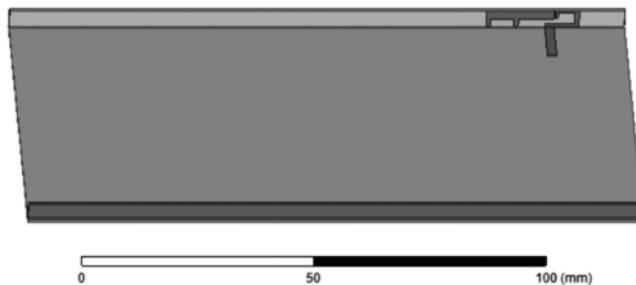


图 5 侧向耦合的 UWB 倒 F 天线透视图

### 6 结论

本文介绍了当前应用较为广泛的几种天线,如 MIMO 天线和频率可重置天线,其中 MIMO 天线由于高频谱利用率高和高可靠性成为热门,但在设计过程中存在天线单元间的耦合问题,目前常采用寄生单极子单元提高隔离度,可同时也会对其他参数产生消极影响。因此,设计出一种新的去耦网络,尤其是用于改善同一平面上天线结构的隔离度是很有必要的。

#### 参考文献

- [1] FENG B, LI L, SIM C. A dual-band dual-polarized stacked microstrip antenna with high-isolation and band-notch characteristics for 5G microcell communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(7): 4506-4516.
- [2] NIE Z, ZHAI H, SHI J. A dual-polarized frequency-reconfigurable low-profile antenna with harmonic suppression for 5G application[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(6): 1228-1232.
- [3] ABDULLAH M, BAN Y, AMIN M. Compact four-port MIMO antenna system at 3.5 GHz[C]. 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), 2017: 656-660.
- [4] 李祎昕, 邹欢清, 王明凯, 等. 一种面向 5G 通信的宽带 8 单元 MIMO 天线设计[J]. 电波科学学报, 2018, 33(4): 447-454.
- [5] LIN Y, CHEN W, CHEN H. High-gain MIMO dipole antennas with mechanical steerable main beam for 5G small cell[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,

(下转第 15 页)



## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所