

分类号_____

家 好
N _____

U DC _____

编号_____

率 束 交 通 大
学 硕 士 学 位
论 文

宽带双极化基站天线的研究与设计

学位申请人： 李屹超

学 科 专 业： 信息与通信工程

指 导 教 师： 刘志伟副教授

答辩日期:

华东交通大学2018届硕士学位论文

宽带双极化基站天线的研究与设计
信息工程学院 李屹超

独创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表和撰写的研究成果，也不包含为获得华东交通大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

本人签名. _____ 日期 _____

关于论文使用授权的说明

本人完全了解华东交通大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅。学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

保密的论文在解密后遵守此规定，本论文无保密内容。

本人签名. _____ 导师签名 _____ 日期 _____

宽带双极化基站天线的研究与设计

摘要

移动通信技术的发展离不开基站天线的改进，基站天线作为移动通信中的重要组成部分，其小型化，智能化对移动通信系统有着深远的影响。更小的基站天线意味着更低的成本以及更小的安装难度，这给基站天线的密集化组网奠定了基础。而智能化的天线可以根据通信需求动态自适应地调整天线阵列各单位的信号幅度和相位权值，从而获得相应方向上的最大增益。随着越来越近的5G技术，通信系统对新型基站天线的需求也越来越大，研究基站天线的多频带、双极化、小型化等新型结构具有重大意义。

首先，介绍了基站天线的现状和相关研究，对基站天线的理论进行了阐述，以现今运营商对基站天线的基本要求为背景，明确了文章宽带双极化天线的基本结构。

然后，设计了一款印刷 PCB 基站天线，在组成阵列后，考虑到天线的隔离度问题，对阵子结构进行交错排列。经过一系列的仿真和测试，天线的工作频段在1880 MHz-2635 MHz，在最大辐射方向上的增益为8dB，驻波比小于1.5，说明该天线具有较好的定向性和驻波比，证明了设计方法的有效性。

最后，设计了一款宽带双极化基站天线单元，工作频段覆盖1.71 GHz-2.7 GHz，利用HFSS软件分别对功分器和振子的优化，经过加工测试，测得天线增益为8dB，驻波比小于1.4，最终获得了满足要求的模型。

通过本文的研究，对宽带双极化基站天线的工作原理和设计方法进行探索和研究，为相应的基站天线提供了理论依据和参考结果。

关键词：基站天线，双极化，阵列天线，功分器

Research and design of broadband dual polarization base station array antenna

ABSTRACT

The development of mobile communication technology cannot leave the improvement of the base station antenna, as an important part of mobile communication base station antenna, its miniaturization, intelligence has a profound influence on mobile communication system. Smaller base station antennas mean lower costs and smaller installation difficulty, which lays the foundation for the densification of base station antennas. The intelligent antenna can adjust the signal amplitude and phase weight of the antenna array according to the demand of communication dynamically, thus obtaining the maximum gain in the corresponding direction. As more and more closer to 5G technology, the communication system of the demand for new base station antenna is becoming more and more big, the base station antenna of multiband, double polarization, miniaturization and so on the new structure is of great significance.

First of all, this paper introduces the present situation of base station antenna and related research, explains the theory of base station antenna, with current operators on the basic requirement of base station antenna as the background, clear the basic structure of the article broadband dual polarized antenna.

Then, a printed PCB base station antenna was designed, and after the array was formed, considering the isolation of the antenna, it was staggered and arranged against the substructure. After a series of simulation and test, the antenna operating at 1880 MHz to 2635 MHz frequency band, the maximum radiation direction of 8 dB gain, VSWR is less than 1.5, shows that the antenna has good directionality and standing wave ratio, proved the effectiveness of the proposed design method.

Finally, designed a broadband dual polarization base station antenna unit, 1.71 GHz to 1.71 GHz frequency coverage, using HFSS software the optimization of power dividers and vibrator, respectively, after processing and testing, measured antenna gain is 8 dB, VSWR is less than 1.4, ultimately meet the requirements of the model are obtained.

Through the study of this paper, the working principle and design method of the broadband dual-polarized base station antenna are explored and studied, and the theoretical basis and reference results are provided for the corresponding base station antenna.

Key Words: base station antenna, the dual polarization antenna array, power divider

目录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 基站天线的发展现状及展望	2
1.2.1 基站天线的分类及发展现状	2
1.2.2 国内外基站天线的研究现状	3
1.2.3 移动通信基站天线技术展望	3
1.3 本文的工作和安排	5
第二章 基站天线的基本理论	6
2.1 引言	6
2.2 基站天线简述	6
2.3 振子的基本参数	7
2.4 阵列天线的基本原理	9
2.5 基站天线的主要性能参数	11
2.5.1 基站天线的电路参数	11
2.5.2 基站天线的辐射参数	12
2.5.3 基站天线一体化	13
2.6 双极化基站天线	13
2.7 本章小结	15
第三章 印刷PCB双极化基站天线设计	16
3.1 引言	16
3.2 双极化基站天线单元设计	16
3.3 双极化基站天线阵列设计	21
3.4 本章小结	28
第四章 新型宽带双极化天线设计	29
4.1 引言	29
4.2 宽带双极化天线的仿真与设计	29
4.3 功分器的设计	31
4.4 天线阵列的仿真与设计	35
4.5 本章小结	41
第五章 总结与展望	42
参考文献	43

个人简历 在读期间的研究成果及发表的学术论文..... 47
致谢 48

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

随着信息社会发展的要求日益提高，无线通信已成为重要的技术手段。信道容量在不断的扩充并提速，而运行信息网络的体制和服务方式等也在不断的变革着。无线通信的高速进步为我们的生活带来了崭新的变化，其所具有的可移动功能使其可以完全代替固定电话。与此同时，移动通信技术仍在迅速发展，第四代移动通信系统也在不断完善。网络功能在当下对于移动通信有着新的需求，为求具备高质量、低成本、高频谱的利用率，移动通信技术正进行着新的改革升级。

移动通信在传播和接受无线信号的时候，会受到各种外界环境的影响并出现距离性的衰减。因此，移动通信的发展需要不断地改进基础设施来提供硬件支持，基站天线就是信号传递的中转站。基站天线能够在基站与信号覆盖区域中的移动台之间形成无线信号的收发线路，信号起于基站的收发信机，然后经控制器、交换中心等模块的合作共同完成通信过程。基站天线的性能决定了移动通信系统的整体性能，因此基站天线需要进一步扩展其功能和性能[1]。

天线在多种环境中的应用形式各不相同，在室内环境下最好采用的是全向的吸顶天线，定向壁挂式的田野也比较适合室内使用。在城市中，各种建筑物比较密集，对于信号的阻挡作用较强，所以应用在日常通信增益范围内、水平面波束宽度 65° 的双极化天线比较适宜。而如果是郊外地形比较开阔的区域，或者它更适合高速、 90° 或 65° 水平波束宽度，垂直极化定向天线适用于高速公路覆盖的无障碍场所[3]。因此对于基站天线的技术指标需要根据实际需求、天线的阵列结构以及天线的材料进行具体的仿真后得出最佳指标。对于基站天线来说，一般要求增益大于 8dBi ，电压驻波比小于1.5，前后比大于 27dB ，隔离度大于 28dB 。

随着现代通信技术的发展，现有的3G、4G通信以及即将到来的5G通信之间的兼容问题以及三大运营商采用的不同频段之间的兼容问题要求基站天线支持多个工作频段，同时需要考虑天线的成本和材料问题，所需求的基站天线发展方向逐渐的转向了多频段、多功能、多极化、小型化发展方向。当前社会各方面的发展十分迅猛，对于通信各方面的需求也越来越高，为满足当前需求，通信技术急需发展成全天候、全空间并且安全可靠的通信服务，而移动通信则能够满足图像、视频、语音等多种数据的传输，移动通信则是为满足当前人们生活需求的重要工具。

在近百年中，电子信息时代的蓬勃发展也推动着移动通信不断地创新着，3G已经不能满足当前对数据传输的需求，4G移动通信系统已经成为目前普及了的通信系统。据国家新办公厅关于发展上半年召开的2017届工业通信产业会议，截至6年底，手机用户总数达到13亿6000万人；移动宽带用户总数达到10亿4000万人；第二代移动通

信和第三代移动通信用户继续转换为第四代移动通信用户，用户数量继续稳步增长，共有8亿8800 万户，占手机用户的65.1%。移动通信系统的迅速发展给人们的生活和工作带来了极大的便利，也为我们的产业升级提供了技术支持。移动通信的基本设备要求也在不断更新。以基站天线为例，当前的天线不仅能够满足行业规范，其性能也不断的革新，低成本、高性能的基站天线在目前已经逐渐的走向成熟，而当前的主要方向仍是将低成本、高性能、微型化且便于安装集于一身的新型基站天线[46]。

双极化天线利用正交电磁波的非相干性和电磁波在无线信道中的多径传播效应，在收发信机双工模式中同时操作垂直于 45° 或两个偏振度方向的偏振度和 45° 方向的天线，形成双极化[71]。宽带双极化天线既可满足通信系统扩展频带的要求，又满足通信系统容量提升的要求，还可以有效减少天线安装的数目，在移动基站中获得了广泛应用[81]。

1.2 基站天线的发展现状及展望

1.2.1 基站天线的分类及发展现状

基站天线的分类如图1-1所示。目前，基站天线已经展开了小型、低成本、宽频、智能的技术变革，当前的常用结构的极化方式为线极化，分为单极化和双极化。两种的区别在于单极化天线选用垂直线极形式，而双极化天线则是 $\pm 45^\circ$ 的方式。双极化天线能够极大程度的减少天线数目，节约对于空间的占用，在此领域有极大的优势，当前的应用也很广泛。双极化天线的设计技术要点在于如何提高交叉极化比，以及端口建隔离度如何提高并压缩设备结构等方面。所以当前基站天线的各项研究倾向于改进基站天线性能，并兼以做到成本的降低、装配难度的简化等方面[91]。

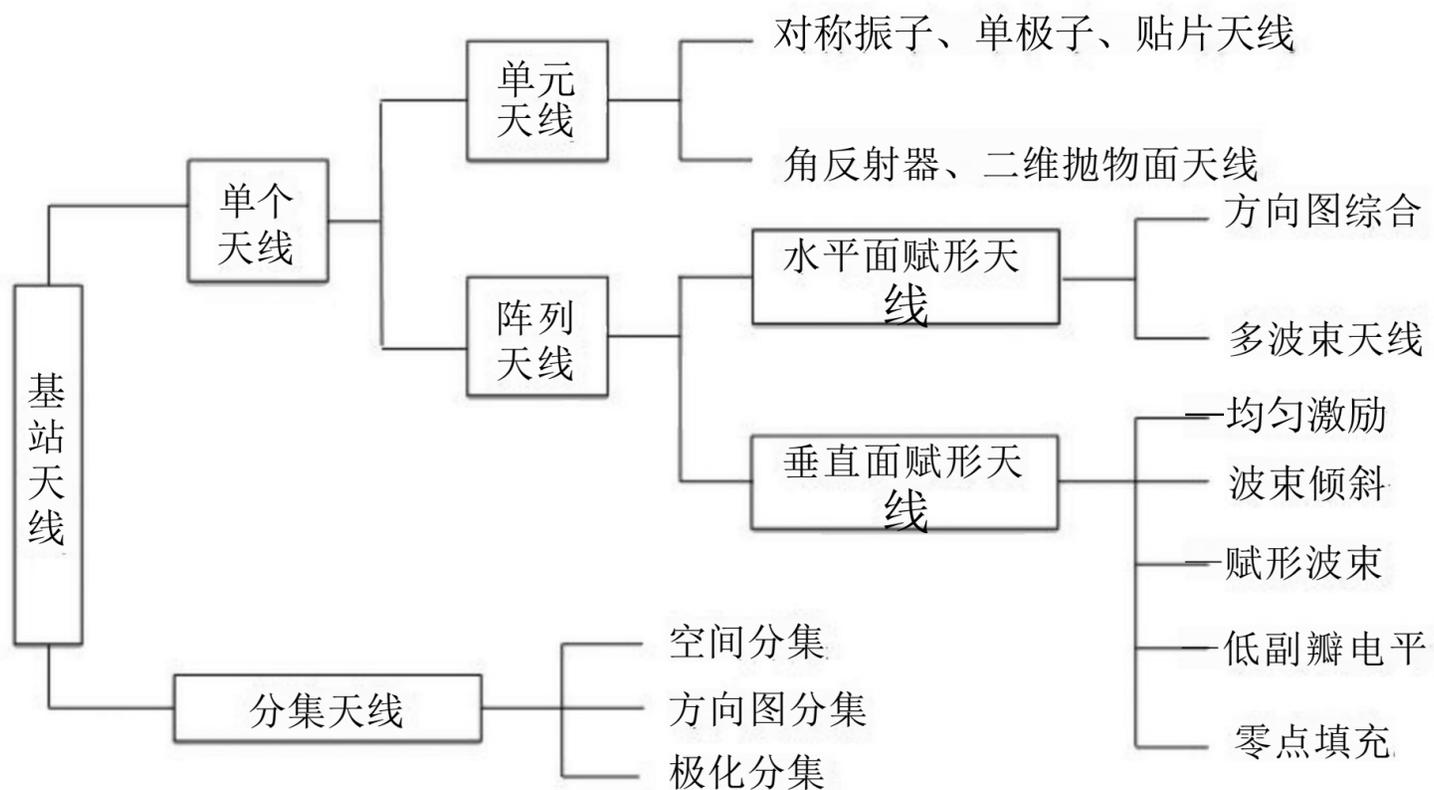


图1-1 基站天线的分类

Figure1-1 Classification of base station antennas

传统的基站天线，无论是单元天线或者阵列天线都属于单个天线的范畴。这类天线虽然因为结构简单，节省了许多成本，但是随着城市的高楼越来越多，信号的多径衰落问题日益严重，这就诞生了分集天线。所谓分集天线，其实是对单个天线的辅助与补充。天线中的一部分天线负责电磁波的发送和接收，另一部分天线只负责接收，然后合并接收的信号，经过一系列处理后选择最优信号进行传输，从而减少多径衰落对信号的影响。这里的合并处理并不是叠加，而是选择最优信号进行处理。

在基站天线的相关行业竞争很激烈，单一的技术优势已经不能够满足当前的竞争阶段，所以既廉价又能够具备其他优势特性的基站天线成为了当前的设计方向。

1.2.2 国内外基站天线的研究现状

国外研究人员多年着重在基站天线的多极化、宽频带方面的研究，并压发出了很多不同形式的天线单元，Nunes 提出的由对称偶极子，并将该理论应用到双频微带印刷单元的设计。另一位Naguib 采用波束倾斜匹配天线单元来设计，实现了垂直波束倾斜的基站天线[110]。

美国在地球同步轨道航天飞机上启用了这样一种可展式的天线，这种天线摒弃了传统的径向肋条结构，应用了新的周向的环箍结构，这样就能够让他表面的精度高达0.1 mm。除此以外，在配置的先进射电干涉仪上面的可展式天线还应用了双偏置的格里高里式，并通过阵列馈源上的矫正技术，让射电干涉仪表面的精度高达0.25 mm，能够满足8~86 GHz 的工作环境。不仅如此，研发的膨胀可展式天线也为 FEM 专用软片提供了支持。

日本就可展式反射面天线的研究也紧随美国，日本关于工程试验卫星的天线，设计了能够使表面精度达2.4mm 并且在指向方面精度可以达到0.83°，满足 S-波段工作环境的天线。加以研发的空对地长基线干涉仪能够工作在22/5/1.6 GHz 的环境下[]。

国内对于基站天线的研究也在快速展开着，应用基站天线的主要极化方式被分为了以下两种：单极化和多极化。双极化天线可以提高天线的交叉极化率，并能有效地改善端口间的隔离度，使天线的整体结构更加紧凑，从而实现天线的小型化。我国当前正处在发展新时期，需要更高的环保要求，人们对于环境和自身健康的认知在不断的增强。基站天线不仅是占空间或辐射等多方面的属性，成为了当前我国研究天线的主要课题，同样也是以人为本开展科学工作的重要表现。

1.2.3 移动通信基站天线技术展望

移动电话是时代的产物，而保持随时随地的通话基础已经成为了一个历史变革。在当前，我们的生活生产迎来了新的时机，在新时机之下的人们生活生产都有了新的需求。移动通信网络的出现，不仅联通了区域间的语音交流，甚至做到了画面、视频交流。而进一步衍生出的互动则需要更多的技术、设施设备支持。合理的设计能够将无线通信的

信道容量进一步提升。当前的基站天线其性能以及技术要求正不断的发展着，这也适应了当前的移动通信网络的需求，基站天线在多种天气、地形、温度等环境中的运作，同时也为生产、加工、运输和基站天线安装工作提出了新的挑战，作为具有不同空间站的电磁信号交流信号收发器，基站天线已成为移动通信系统的重要组成部分。

在基站天线实际安装中，出现了很多的负面问题，当前建筑行业的发展以及人居环境的升级，高质量、高要求的网络服务是当前的重点建设任务，这也是移动通信网络运营商的新要求。移动通信网络运营商在当下应当以实现全地区覆盖、无缝覆盖网络作为首要任务，加强加大网络的建设力度，在满足当前“生态城市”建设潮流下，不仅要保护城市中环境景区，还要履行社会法规要求，目前多数大型城市已经开展了整顿建筑顶部环境的工作，建筑顶部是无线网络信号天线安装的常见位置，在将来的工作中要提前预想到。

天线设备的辐射强度虽然是在我国国家标准之下的，能够满足人居环境的辐射限制。但是无线网络所配置的基站天线等常常建设在建筑物的顶部，这样不加防护的直接方式让周边的居民主观上存在抗拒情绪，并在舆论的推动下进一步的产生反感，一系列的问题最终会导致基站天线以及其他设备在安装工作中的困难。不仅如此，裸露在建筑物顶部的天线设备还会因为长期的日晒雨淋，设备器件会逐渐的老化，这就加大了设备的后期维护、更换费用[12]。

为解决以上问题，在基站的设计中不仅要考虑设备的性能以及成本，还需要增加美化、加固工作，为天线设备等加设保护层不仅能够从外表上起到美化作用，对于设备的保护也具有积极意义。根据周围居民的心理，增添美化结构还能够将天线隐蔽起来，不仅能够起到加固的作用，同样也让周围人民眼不见为净，满足了周围居民的心理需求，宏观上也为环保做出了贡献。而对于天线的美化也有很多措施，环境以及设备、性能的需求不同，所采用的措施也要应时而变。通过实际的安装环境来选择设备美化形式也更具有灵活性，“绿化天线”能够通过利用一些植物来装饰包裹设备，这样还能够提高城市的绿化面积，这种伪装形式常常被应用在野外或绿化面积较广的公园、森林中，在高级小区中也多有应用。“隐藏天线”从字面上便可以看出，其用意在于将天线设备隐藏起来，这就让天线设备不那么突兀，能够真实安转载很多建筑物中，但又不会对建筑物或设备产生外观上的改变，这种方式经常与宣传广告或者具有形态意义的建筑物上，比如一些具有纪念意义的场馆或艺术雕像以及宣传广告上。隐藏天线能够省去美化材料的材料费，但对于遮挡物则具有一定要求，以防因隐藏设备而降低了天线的实际性能。

随着多种多样的天线不断的出现，天线的设计工作也就变得日益灵活，而展开基站天线工作则需要考虑更多的影响因素，不仅要考虑搭配安装环境以及周围的地理条件，还要对服务要求进行研究。在预先进行充分计划的基础上优化天线的各项性能参数，才能够改善网络的覆盖质量，将移动通信网络的承载力进一步提升，提高对移动通信网络的基础资源利用率，这样才能够在提高企业自身效益的同时提供最好的服务给用户。随

着天线技术的逐渐完善和发展，以多种形式来优化天线设计并加入现代化职能技术是一个必然趋势。高质量、低成本、高频谱的利用率，移动通信技术正进行着新的改革升级，基站天线也展开了小型、低成本、宽频、智能的技术变革。在建设移动通信网络的同时，重视对周边环境的保护也极为重要，实现和谐共发展的任务需要铭记，推动移动通信网络技术的和谐发展是我们相关工作者的重要使命[13-18]。

1.3 本文的工作和安排

本文在开头部分阐述了目前基站天线的研究热点以及一些基础理论，然后针对这些理论和常见的需求分别设计了一个工作在1880 MHz-2635 MHz 以及1.71GHz-2.7 GHz 的双极化基站天线辐射单元和阵列结构，具体安排如下：

第一章为绪论，主要阐述了课题的研究背景，研究意义和发展现状，对基站天线进行分类并简述双极化天线，最后介绍了论文的具体安排；

第二章为基站天线基础理论，主要简介了基站天线的辐射单元及阵列的参数和原理，双极化天线的基础理论；

第三章主要提出了一款工作在1880 MHz-2635 MHz的印刷 PCB 天线单元的仿真设计，仿真结果，天线单元优化，天线阵列设计以及天线测试结果的分析；

第四章主要提出了一款工作在1.71 GHz-2.7 GHz的压铸一体化天线单元的仿真设计，仿真结果，天线阵列设计以及天线测试结果的分析；

第五章是本文的总结与展望，主要介绍了未来基站天线发展的趋势以及5G 基站天线和 MIMO 天线等新型技术。

第二章 基站天线的基本理论

2.1 引言

基站天线是一种变换器，在移动通信系统负责将射频电缆中的电信号转换为电磁波信号发送到自由空间中或者接收自由空间的电磁波信号并将转换为电信号。本章描述了基站天线的基本原理，天线辐射单元的基本参数，天线阵的原理和天线设计的基本参数，最后对本文研究的双极化天线进行简要说明。

2.2 基站天线简述

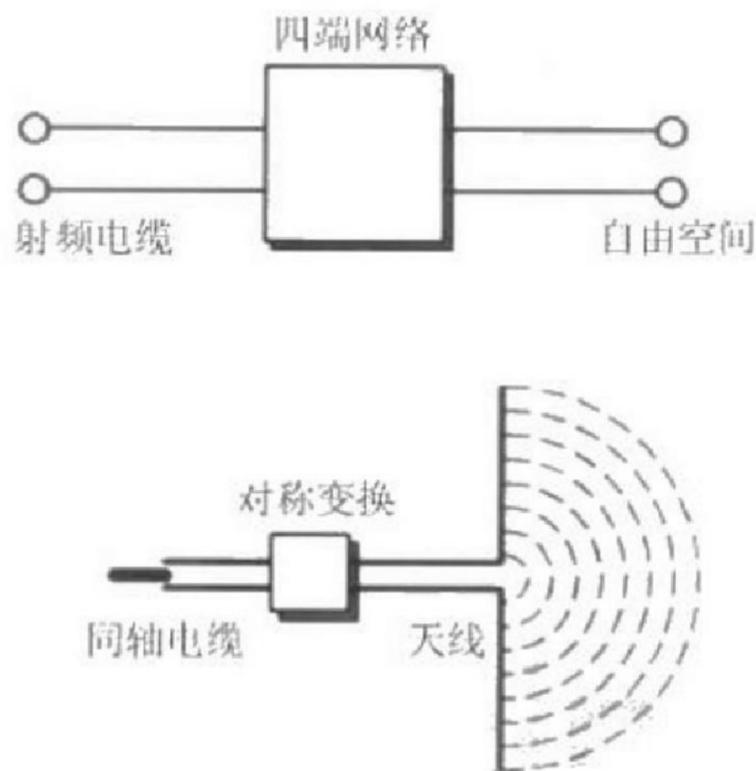


图2-1 基站天线电路原理图

Figure2-1 Principle of the base station antenna

基站天线电路原理图如图2-1所示，在整个通信系统中，基站天线负责一定区域的信号的发送与接收。基站天线一般由辐射单元、平衡馈电器、反射板、馈电网络、接头等部分组成，其中，全向天线一般不安装反射板[19]。

辐射单元是天线的主要组成部分，可以使电信号与电磁信号的相互转化。

平衡馈电器主要用于同轴馈电的馈电方式下，可以使对称振子的两臂电流对称。

反射板可以显著提高天线的方向性，提高天线增益，调节半功率波瓣宽度等。

馈电网络通常被用于控制辐射单元的振幅和相位，同时传递电信号。

接头是链接外部电缆的接口。



图2-2 基站天线结构

Figure2-2 Structure of the base station antenna

图2-2所示为基站天线的外观结构，由上下端盖，上下安装夹具，外罩和射频电缆接头构成。射频电缆接头连接基站，主要负责电信号的传递工作。

2.3 振子的基本参数

基站天线的辐射单元选用的就是对称振子天线，这种天线辐射单元结构上很简易，应用面很广，能够拆分出作为独立天线运作，也能够构成天线阵列使用。这种对称振子的频谱较其他种类比较广，能够配合很多种类的无线电设备来运作。对称振子通常由两根长度和直径相同的直导线组成的，反馈电信号的位置在两个导线的中间。每根导线长度为 l ，这一长度就是我们常说的天线臂长，臂长为 $\frac{\lambda}{4}$ 的对称振子称作是半波振子[20]。

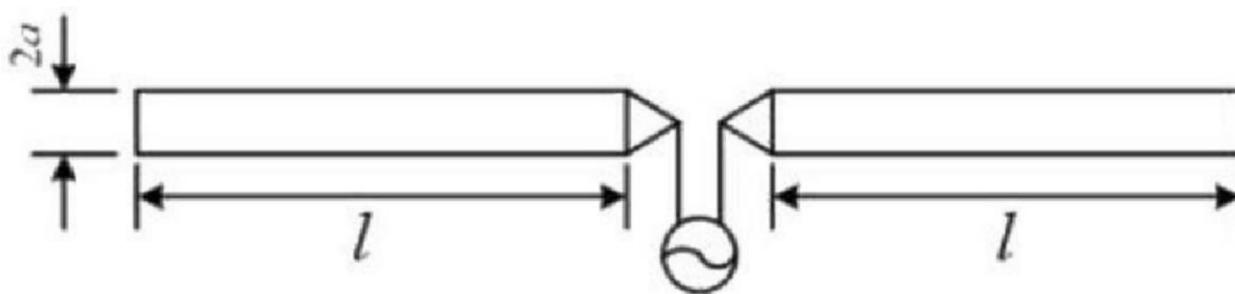


图2-3 对称振子的结构

Figure2-3 Structure of dipole

对称振子可以看做具有一定角度的开路天线。其振子对于电流的分布通常视作开路长线上的两根导线电流的分布，在没有消耗的开路天线上，电流的分布规律是按正弦规律布置的，所以对称振子上面的电流也以这种规律分布的，并且在对称振子的双臂上电流分布是由点长度所决定的，电流分布情况如下[21-24]：

$$I(z) = \begin{cases} I_m \sin \beta(l-z) & 0 < z < l \\ I_m \sin \beta(l+z) & -l < z < 0 \end{cases} \quad (2-1)$$

在公式中， I_m 为波腹电流， l 对应的长度为对称振子的单臂， β 对应对称振子电流传输相移常数， $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_a}$ （ λ_a 指的则是在振子之上的波频长度），假设忽略掉损耗，

$$\beta = k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (k \text{ 为自由空间的相移常数})。$$

对称振子其单边臂长为 l ，建立的球坐标系中振子轴沿其 z 轴放置，坐标原点视为振子的中心点，在振子中心能量激励。 $\beta = k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 的电流分布情况则可以通过下式求得：

$$I(z) = I_m \sin \beta a - |z| \quad 0 < z < l, -l < z < 0 \quad (2-2)$$

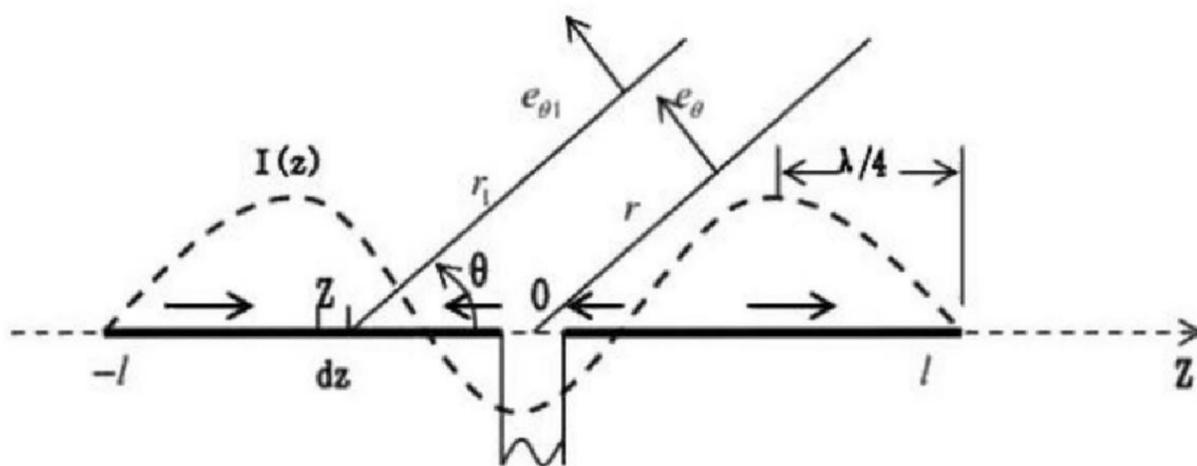


图2-4 对称振子的电流分布

Figure2-4 Current distribution of dipole

在天线的实际设计过程中，通常会对天线的方向图、波瓣宽度、增益、效率、输入阻抗、驻波比、频带宽度、极化方式等进行研究设计，以满足实际应用要求[25]。

架设在地面上的线天线通常使用两个相互垂直的平面来表示他们的方向图，如图2-3所示，

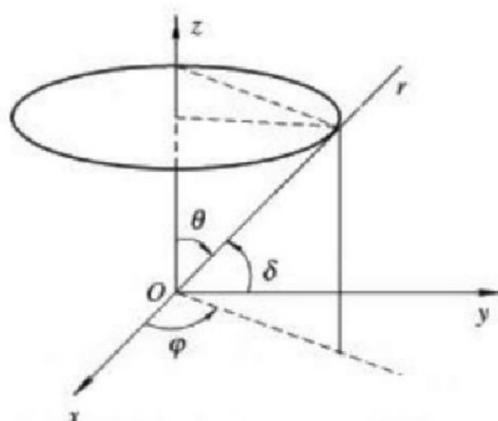


图2-5 天线的方向图

Figure2-5 Pattern of antenna

其中，水平面方向图指的是当仰角 δ 及距离 r 为常数时，电场强度随方位角 ϕ 变化

的曲线，垂直面方向图指的是当 ϕ 及 r 为常数时，电场强度随仰角 δ 变化的曲线。

天线的效率定义为天线辐射功率与输入功率之比，记为 η ， $\eta = \frac{P_{\Sigma}}{P_i} = \frac{P_{\Sigma}}{P_{\Sigma} + P_l}$ ，式中， P_i 为输入功率， P_l 为欧姆损耗。

天线的驻波比定义为传输线上波腹点电压振幅与波节点电压振幅之比，用 ρ 表示， $\rho = \frac{|U|_{\max}}{|U|_{\min}}$ 。驻波比表征了天线系统的天馈线与基站的匹配程度，驻波比越大，入射波未能发射出去的能量越多，匹配越差。所以为了保证天线的效率，在基站天线的设计中通常要求驻波比 $VSWR < 1.5$ ，但由于反射波总是存在，所以 $VSWR$ 一定大于1。

天线的极化描述的是在最大辐射方向上，天线电场矢量的方向随时间变化的规律。理想情况下，线极化天线的电场矢量只沿一条直线来回振荡。但在实际情况下，线极化天线的电场矢量在极化方向的正交方向上有分量，因此引入交叉极化电平来表征线极化的纯度。

2.4 阵列天线的基本原理

天线阵列的辐射特性取决于组成阵列的振子数目、振子的间距、幅度和相位、反射板和振子的分布，通过控制这几个因素来获得需要的辐射场的特征。天线的辐射方向图可以描述天线的辐射特性随着空间方向坐标变化关系，可用阵列因子和阵元因子的乘积来表示，即[26-30]：

$$E(\theta, \phi) = F(\theta, \phi) F_e(\theta, \phi) \quad (2-3)$$

其中， $F_e(\theta, \phi)$ 为阵列因子， $F_e(\theta, \phi)$ 为阵元因子。

描述天线辐射参数的是方向性系数和增益。在相同的辐射总功率下，将阵列天线的辐射密度 P_r 与整个空间的平均功率密度 P_a 之比，定义为某一指定方向上的方向性增益[31]。

辐射密度为：

$$\begin{aligned} P_{rad} &= \frac{1}{2\eta r^2} [E(\theta, \phi) e^{-jkr + j\omega t}] \times [E(\theta, \phi) e^{-jkr + j\omega t}] \\ &= \frac{1}{2\eta r^2} |E(\theta, \phi)|^2 \end{aligned} \quad (2-4)$$

其中， $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = 120\pi$ ， r 为距离， (θ, ϕ) 为测试方向。

阵列辐射总功率为：

$$\begin{aligned}
 W_{rad} &= \iint P_{rad} ds = \frac{1}{2\eta r^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |E(\theta, \phi)|^2 r^2 \sin \theta d\theta d\phi \\
 &= \frac{1}{2\eta} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |E(\theta, \phi)|^2 \sin \theta d\theta d\phi
 \end{aligned} \tag{2-5}$$

$$W_{rad} = \iint P_{rad} ds = \iint P_{av} ds = 4\pi r^2 P_{av} \tag{2-6}$$

因为 P_{av} 是整体平均功率密度， P_{av} 与 (θ, ϕ) 无关，所以：

$$P_{av} = \frac{W_{rad}}{4\pi r^2} \tag{2-7}$$

方向性增益为：

$$\begin{aligned}
 G(\theta, \phi) &= \frac{P_{rad}}{P_{av}} = \frac{|E(\theta, \phi)|^2 / 2\eta}{W_{rad} / 4\pi} \\
 &= \frac{4\pi |E(\theta, \phi)|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |E(\theta, \phi)|^2 \sin \theta d\theta d\phi}
 \end{aligned} \tag{2-8}$$

一般用字母 D 表示阵列方向性系数，即：

$$D = G(\theta, \phi)_{max} = \frac{4\pi |E(\theta, \phi)|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |E(\theta, \phi)|^2 \sin \theta d\theta d\phi} \tag{2-9}$$

辐射强度是单位立体角的辐射功率，辐射密度是单位面积的辐射功率：

$$U(\theta, \phi) = r^2 P_{rad} = \frac{1}{2\eta} |E(\theta, \phi)|^2 \tag{2-10}$$

其中， $U(\theta, \phi)$ =辐射强度(W/单位立体角)， P_{rad} =辐射密度(W/m²)。

总辐射功率：

$$W_{rad} = \iint_{\Omega} U(\theta, \phi) d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \tag{2-11}$$

其中， $d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$ 为立体角元。式(2-10)、(2-11)可分别写成：

$$G(\theta, \phi) = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \tag{2-12}$$

$$D = \frac{4\pi U(\theta, \phi)_{\max}}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)_{\max}}{W_{rad}} \quad (2-13)$$

也可以把式(2-13)写成:

$$D = \frac{4\pi U(\theta, \phi)_{\max}}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi} = \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad (2-14)$$

$$\Omega_A = \left[\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \right] / U(\theta, \phi)_{\max} \quad (2-15)$$

2.5 基站天线的主要性能参数

2.5.1 基站天线的电路参数

天线一般情况下都是接通传输线并连接到发射机之上的，一般来讲，都是运用同轴线这种结构的传输线，天线连接到传输线的截面之上，天线作为传输线的负担荷载，能够把天线归类为电路端口，在分析研究中能够通过路的方式展开。首先分析基站天线的电路参数，其中考虑较多的则是，电压驻波比、回波产生的损耗以及隔离度等。在传输线的天线设备中，电压可以由两个极端之间的比率形成，通常称为电压的波比，移动通信系统基站天线的要求为驻波比小于1.5，此时系统96%的能量可以发射出去，一旦驻波比过大，能量则会在传输过程中发生多次反射，传输线的损耗就会显著增大，就会对整个通信系统的内部构成影响。

在一个基站天线里，两个或者多个天线存在的时候，一般是把所有天线等效的看成是电路端口，而在天线间产生耦合影响的剧烈度就称作是隔离度。常规情况下的双极化基站天线其单元一般设置在 $\pm 45^\circ$ 线极化的两支天线中间，这两个天线虽然是相互正交的，但是两个天线间相互产生耦合。一般在移动通信里，双极化基站天线其隔离度被要求在25 dB之上的150]。

天线的性能需要在设计前就进行参数估算，这样对于改善天线研发设计的质量和效率有极大的积极作用，微带天线也能够借此缩减设计研发成本。对于天线性能的分析主要为以下几个过程，首先便是对应边界的条件并通过Maxwell方程组一起解答这一问题，对天线周围的电磁场也能够通过这种方法来计算，其次则是应用天线的参数计算公式，并对天线增益、方向图、输入阻抗、方向图等多项关于天线的特性指标。最后就是综合性的分析天线参数值，通过以上三种方法就能够优化天线设计。

目前分析天线的方法主要是以下两类，其一是理论方法，理论方法主要运用的是多网络模型法和空腔模型法等，第二种便是数值分析法，其中包含了有限元法、谱域法等，空腔法是最常用的一种方法。所谓空腔法的基本理论是腔膜理论法，是1979年的学者

罗远祉所提出的能够通过微带谐振腔分析法解决相关问题，这一理论能够综合微带贴片、介质的周边以及地板围城的空间视为电壁，周边还有作为磁壁的谐振腔。造成腔体损耗的主要原因是边缘裂缝引起的损耗。通过空腔模型来计算能够按照以下步骤，首先便是解决空场内场的问题，然后求得边缘电场切变方向的分量，这样能够对在处于边缘的等效磁流进行计算，最后则是通过所求的等效磁流来求得天线所能够产生的辐射场。

2.5.2 基站天线的辐射参数

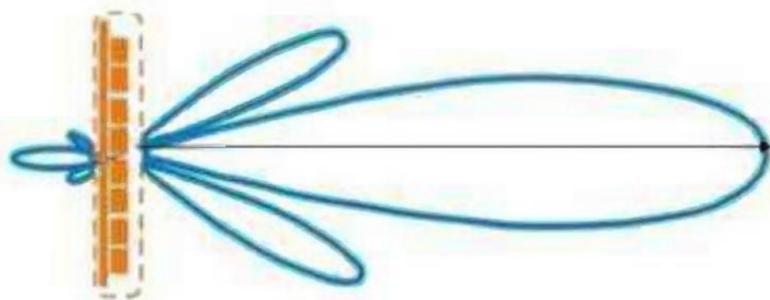


图2-5 天线辐射方向图

Figure2-5 Radiation pattern of antenna

天线进行运作的实质在于放出辐射并接受电磁波，为了使得天线能够有方向的辐射，但是天线在对多种角度做辐射时所释放的电磁能量不同。统计天线朝着多个方向辐射的磁场强度以及方向角度并绘制成图，这种图能够方便设计，一般绘制三维立体的方向图表现的更为形象，但也具有难于度量的缺陷。在工程方面需要参照电场计划方向，对方向图进行分解，分解成 E 面和 H 面；也可分为垂直方向与水平方向两种。基站天线产生辐射的参数主要有波束宽度、极化、相位以及场强这几种，一般是在天线的远区测量的，一般是利用空间坐标进行函数表示的。在天线水平放置时，天线方向图的 E 面是指与电场方向平行的方向图切面；H 面是指与磁场方向平行的方向图切面。水平面波束宽度，在水平方向上，在最大辐射方向两侧，辐射功率下降 3dB 的两个方向的夹角。垂直面波束宽度：在垂直方向上，在最大辐射方向两侧，辐射功率下降 3 dB 的两个方向的夹角。

在天线的辐射方向图中可以获得半功率波束宽度，并且从最大辐射方向将图像的功率密度降低到一半，角域的宽度减小到半值。辐射功率越集中，半功率光束变窄时天线的方向性越强，方向性的系数意味着天线处于最大的辐射方向之上所能够产生辐射的强度，理想化的点辐射源辐射之间的对比一般采用的是 dBi 为计算单位，理想化的电源其方向性的系数一般是定义成 0dBi 的。

观察辐射方向图，能够看出天线所辐射的相关辐射参数，而天线的主要辐射能量则是通过主极化方向图来表示。而交叉极化是和主极化相对的一个概念，在设计一个天线的过程中，我们往往需要定义其辐射的电场振动形式，这个电场振动形式的极化为主极化，其他的极化则被定义为交叉极化。在途中，方向交叉的极化图对于天线所占的辐射能量比值较小，在辐射的最大值的方向上的主偏振电平和交叉极化的电平之间的差异通

常被称为交叉极化率。

在主极化方向图里，一般情况下会将天线能够辐射伪中比较集中的主波束范围叫做主瓣，其他的部分就能够称作旁瓣或者副瓣。各种瓣数量的变化会对电平构成影响，而基站天线的水平其产生辐射的方向图也会受天线反射板呈现不同的形状¹⁵²。

2.5.3 基站天线一体化

在进行基站天线的工程设计中，需要对基站天线的各项指标多加考虑，其中最重要的便是辐射参数以及电路参数，在设计工作者的眼中，基站天线的辐射参数主要从方向图中识别，为了保证天线具有高效的辐射，则需要观察电路参数。在展开设计工作时，不仅要满足对应的设计指标，还要平衡的考虑到设计的实用性。在达成设计的平衡性之后，基于这一基础展开个别指标的优化设计，而优化设计的方向也需要针对天线的应用需求来确定，比如通信的多径衰落、多系统共用以及同频干扰等。在基站天线的设计中，需要用户的满足共同需求同时兼顾个体要求。为了实现关于基站天线能够具备多功能、一体化这样一种设计理念，总结如下¹⁵³⁻¹⁵⁵：

一、三维电磁辐射边界一体化的设计

通过天线关于阵列的相关研究理论，通常关于金属材质的假定反射板，认为无限大，移动通信系统的基站天线工程设计工作，需要对反射板进行尺寸限制，天线辐射单元和辐射方向图在设计中也非常重要，并受其影响。

二、辐射单元一体化的设计

正交极化单元是所有双极化基站天线的基本结构，两个计划电源的联合效应可以实现并实现天线元件的交叉极化和隔离特性，在辐射单元模块的设计中，需要注意集成设计方案的集成。

三、天线辐射参数一体化的设计

联结馈电网络到阵列天线的辐射单元上，发现天线上的阵列辐射单元会相互的产生耦合作用，并引起馈电网络中的电流在幅度和相位的分布上产生畸变，这种畸变会产生驻波比的负面变化。与此同时，在进行馈电网络设计时，设计工作中不同的网络形式、布局、馈电激励都能够引起寄生辐射、表面波以及泄露，天线的指标都会因此产生变化，所以对于基站天线的馈电网络和天线的阵列需要视为整体并展开统一性的优化。

综上，为了更好的设计基站天线，就需要充分的考虑众多指标，并且要考虑到各项指标之间的互相干扰。在设计工作的准备阶段就要总结考虑多项印祖，做出仿真设计的模型，并就模型进行一体化的改善，然后再平衡单一指标并进行优化。

新一代的通信系统中，低成本、小型化是总体的研究方向。

2.6 双极化基站天线

移动通信的环境甚是复杂，抗多径衰落是其中最主要的考虑，分集接收是目前主要

的方法。分集技术主要是通过各种可能的方式对接收到的信号进行采样，然后接收信号的组合或分类，然后选择最佳信号。移动通信应用中一般采用极化分集和空间分集，而极化分集主要应用在基站天线中[56, 58]。

双极化基站天线中的极化分集主要通过两个相互正交的天线，放置在同一天线罩内，这样两个天线接收到的信号就是相互正交互不相关的。两个天线与多输入接入接收机，通过适当的信号矢量合成，正常情况下可以提高3~5dB，从而达到抗多径衰落和多样性的目的。



图2-6 $\pm 45^\circ$ 极化

Figure 2-6 $\pm 45^\circ$ Polarization

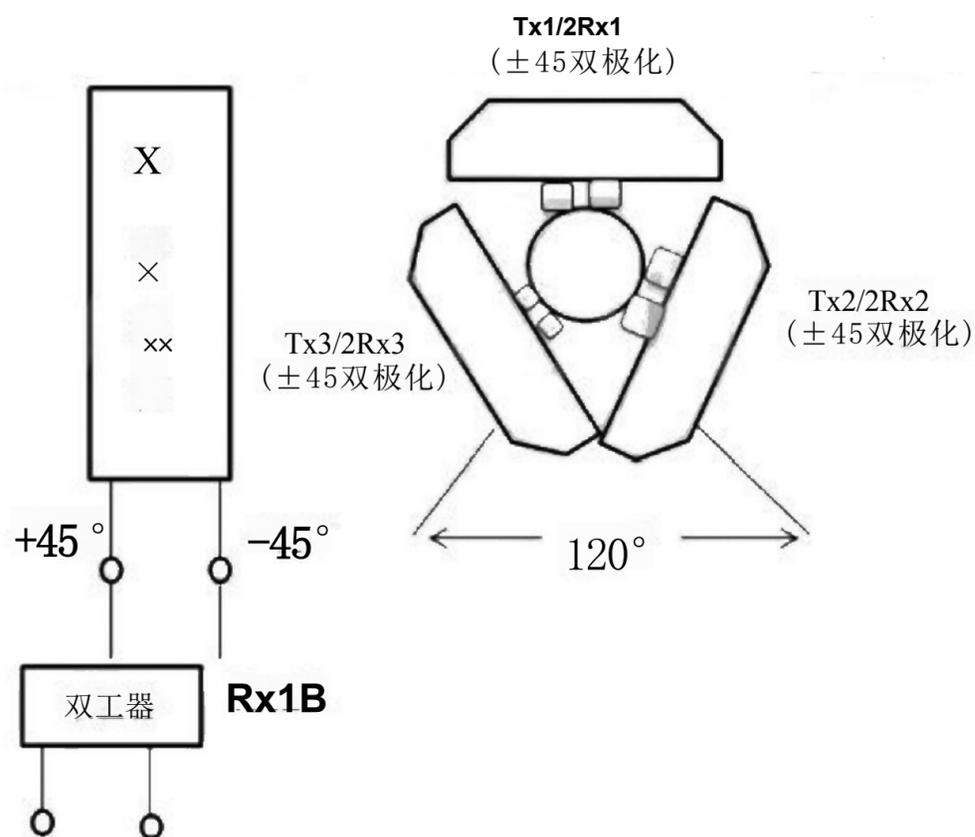


图2-7 极化分集方案

Figure 2-7 Polarization diversity scheme

双极化天线是一种组合了 $\pm 45^\circ$ 极化方向且相互正交的天线，其极化形式如图2-6所示，工作收发双工模式下，这样就降低了单个定向基站的天线数目，每个扇形只需要1根天线。两个天线间 $\pm 45^\circ$ 的极化正交性可以保证隔离度大于28 dB[91]，这样就避免了设计天线隔离度的问题。双极化天线同时具有电调天线的优点，拥有较小的呼损和干扰，

网络的质量得到了提高[60-68]。极化分集方案如图2-7所示，由三个 $\pm 45^\circ$ 的双极化天线，其中一个极化处于收/发双工，另一个极化仅接收。

2.7 本章小结

本章主要介绍了基站天线的基本概念，首先介绍了基站天线的原理图及实物图，对基站天线有一个整体的描述。然后介绍了基站天线辐射单元的特性，一般使用对称振子结构，因为结构简单且可以单独拆卸下来作为天线使用，对辐射单元的设计参数进行了说明。之后介绍了阵列天线的基本原理及性能参数指标，包括电路参数和辐射参数。最后对本文设计的双极化天线的概念进行了整体说明，使用双极化天线的目的主要是为了抗多径衰落。

第三章 印刷 PCB 双极化基站天线设计

3.1 引言

本章设计了一种满足中国移动3G和4G工作频段(1880MHz-2635MHz)的双极化基站天线。经过仿真和实测,该天线满足基站的应用标准,由于使用了双极化天线结构,降低了基站天线的架设安装要求,不需要另外用地建设基站,只需简单地架设相应尺寸的铁柱,更加符合居民区等人群居住地的建设要求。印刷PCB的天线振子结构具有重量轻,体积小,易批量加工的特点,在结构上采用同轴馈电进一步降低了天线辐射的影响,易于阻抗匹配。

3.2 双极化基站天线单元设计

PCB天线一般指的是使用PCB印刷方式制作出来的微带天线,通过在介质基板上腐蚀刻制振子。这种天线具有重量轻、易于加工及批量生产、装配操作简单、宽频带和高级化纯度等特点而作为辐射单元应用在基站天线阵列之中。

微带天线具有外形薄、体积小、制造容易、集成化、电子通信应用广泛等特点,已广泛应用于现代移动通信和卫星通信系统等诸多领域。对于微带天线的实现形式有很多,主要是在基本结构之上进行贴片并加上引入合适的微扰单元,天线的主要模式为幅度等化分离,通过正交兼并模式并满足 90° 相位差,最终实现微带天线的圆极化。近期,微带天线正以层叠结构广泛的投入应用,不仅能够使用到单馈形式中,还能够加以应用到双馈、四馈形式中。激励贴片以及寄生贴片在运行在相邻频率的时候,抗阻的带宽就会受其影响并且出现明显的增长态。这种天线在结构上非常复杂,它的剖面非常高,在相对比较厚的空气层环境中,带宽需要进一步的优化才能够达到阻抗的功能[69]。

许多微带天线在设计中常常在侧馈设置寄生贴片和激励贴片,这两种贴片都会采用正方形的结构,并且为了使整个天线在结构方面能够具备轻巧简易的特性,激励贴片的正上方可以直接通过介质螺钉架设寄生贴片,这就减小了功分器在背面辐射信号时的功效。具有层叠结构的微带天线,一般来讲对比单层的微带天线则具备了更高的增益效果。利用宽频带的微带天线搭配层叠的结构。能够通过相互的调谐来实现层叠结构的优化,并提升微带天线对于抗阻带宽的作用,能够减小空气层厚度对于信号的影响。

在微带天线的设计工作中,关于馈电的结构模式设计非常的重要,会对微带天线的多项基础性电参数产生影响,馈电结构设计工作中,应注意馈电结构与天线辐射原件之间的匹配程度。

微带天线可以使用两种馈电形式,直接馈电包括微带线馈电和同轴馈电两种馈电方式,间接馈电包括电磁耦合馈电、共面波导馈电和孔径耦合馈电。调整微带天线的馈电

方式需要改变馈电点的位置，这样还能够改变天线和馈电线之间的相互匹配度、天线的极化特性、工作形式等等，同样也会出现很多负面的影响。例如天线会出现交叉极化的分量，降低天线出现主极化的辐射功率、除此以外还要利用直接馈电让天线能够调整带宽变窄，所以间接馈电能够调整直接馈电的缺憾[170]。

设计微带天线的第一步是选择合适的介质基片，假设介质的介电常数为 ϵ_r ，对于工作频率 f 的矩形微带天线，可以用下式设计出高效率辐射贴片的宽度 w ，即为

$$w = \frac{c}{2f} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3-1)$$

式中， c 是光速。

辐射贴片的长度一般取为 $\frac{\lambda_c}{2}$ ；这里 λ_c 是介质内的导波波长，即为

$$\lambda_c = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3-2)$$

考虑到边缘缩短效应后，实际上的辐射单元长度 L 应为

$$L = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta L \quad (3-3)$$

式中， ϵ_e 是有效介电常数， ΔL 是等效辐射缝隙长度。他们可以分别用下式计算，即为

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3-4)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_e + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_e - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (3-5)$$

如图3-1所示，相当于两个相互正交的半波对称阵子，由于天线的工作频段在1880 MHz-2635 MHz，取中心频率2.2GHz 计算得出 $H=36\text{mm}$ ，PCB 板厚度为1mm，介电常数为4.4。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/888056075020006071>