

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2017.01.019

引用格式:姬五胜,张丰臣,刘培涛.移动通信基站天线的关键技术研究进展[J].电讯技术,2017,57(1):111-117. [JI Wusheng, ZHANG Fengchen, LIU Peitao. Key technology research progress of base station antenna for mobile communications[J]. Telecommunication Engineering, 2017, 57(1):111-117.]

移动通信基站天线的关键技术研究进展*

姬五胜**1, 张丰臣², 刘培涛²

(1. 天津职业技术师范大学 天线与微波技术研究所, 天津 300222;
2. 京信通信技术(广州)有限公司, 广州 510663)

摘要:基站天线作为移动通信系统中的重要部件,对通信质量起至关重要的作用,其关键技术被广泛研究。通过对基站天线的电调技术、极化技术、宽带技术、阵列天线多频技术和基站天线小型化技术等的研究发展历程介绍,分析了这些关键技术在工程上的实现方法与措施,总结了这 5 个关键技术今后的研究重点和发展方向。在基站天线下一步的发展中,需要将多个关键技术完美地结合在一起,阵列天线多频技术和基站天线小型化技术将成为今后的研究热点。

关键词:移动通信;基站天线;电调技术;极化技术;宽带技术;阵列天线多频技术;基站天线小型化技术
中图分类号: TN828.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-893X(2017)01-0111-07

Key Technology Research Progress of Base Station Antenna for Mobile Communications

JI Wusheng¹, ZHANG Fengchen², LIU Peitao²

(1. Institute of Antenna and Microwave Techniques, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China;
2. Comba Telecom Technology (Guangzhou) Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Base station antenna, as an important component of a mobile communication system, plays a vital role in ensuring the quality of the communication and its key technology has been widely studied. This paper introduces the developing processes of base station antenna technologies, such as electric tilt technology, polarization technology, broadband technology, array antenna multi-frequency technology and base station antenna miniaturization technology. It analyzes the implementation methods and measures of these key technologies in engineering and summarizes their future research emphasis and development direction. In the next step of base station development, several key technologies should be perfectly combined, and array antenna multi-frequency technology and base station antenna miniaturization technology will become research focuses in the future.

Key words: mobile communication; base station antenna; electric tilt technology; polarization technology; broadband technology; array antenna multi-frequency technology; base station antenna miniaturization technology

1 引言

近年来,随着第三代(3rd Generation, 3G)移动通信技术网络的普及以及长期演进(Long Term Evo-

lution, LTE)网络的商用,移动通信已经成为社会经济的重要产业。根据工信部运行监测局披露的数据,截至 2015 年年底,我国移动电话普及率高达

* 收稿日期:2016-09-28;修回日期:2016-11-22 Received date:2016-09-28;Revised date:2016-11-22

基金项目:天津职业技术师范大学 2014 年校级预研项目(KJY14-05)

** 通信作者:wshji1326@sohu.com Corresponding author:wshji1326@sohu.com

95.5 部/百人^[1]。而基站天线作为移动通信网络的重要部件,其性能和质量的好坏直接影响到客户的感知度和整个系统的通信质量。据统计,虽然基站天线在整个移动通信系统设备投资中所占比例不到 5%,但是超过 50% 的网络问题是由基站天线的质量引起的^[2]。因此,研究基站天线的关键技术具有重要的实践意义和应用价值。

基站天线是天线家族的一个小分支,它起源于 20 世纪 80 年代的蜂窝移动通信系统^[3]。1983 年,移动基站天线为全向天线。1989 年,基站天线演进到定向单极化天线,并且是单频窄带,下倾角方式采用机械下倾。1997 年,在上述基础上出现了双极化天线。2001 年,电调技术被应用于基站天线。2003 年,基站天线向多频段应用演进。2006 年,随着高速数据传输技术的发展,宽带技术被应用于基站天线。由于基站天线随着移动通信系统的演进变得越来越复杂,基站天线小型化技术在 2010 年左右被提出并受到广泛关注^[4]。可以看出,基站天线的关键技术不断创新和发展,从单极化到双极化,从机械下倾到电调下倾,从单频段到多频段,从窄带到宽带甚至超宽带,从体积笨重高大到小型化。综合分析这些关键技术,可以为下一代基站天线的设计带来新的思路和理念。

本文介绍了基站天线的电调技术、极化技术、宽带技术、阵列天线多频技术和基站天线小型化技术等研究发展历程,并总结这些关键技术工程上的实现方法与措施,归纳了这 5 个关键技术今后的研究重点和发展方向,最后预测了基站天线今后的研究热点。

2 基站天线关键技术

2.1 电调技术

近年来,随着移动互联网迅猛发展及智能手机的普及,人们对移动通信网络的容量需求呈现爆炸性增长,对网络的质量要求越来越高。因此,优化网络覆盖成为运营商及设备商的关注热点。在网络覆盖中,为使信号良好覆盖,一般需要对基站天线主波束进行一定角度的倾斜。实现主波束下倾的方法有两种:机械下倾和电调下倾。机械天线无论在天线性能上,还是在工程实施上都不如电调天线。因此,电调技术成为基站天线的关键技术。

电调技术就是使电磁波到达阵列天线各单元时

呈现出一个固定的相位差,目的是实现阵列天线垂直面主波束指向下倾。移相器能够实现这个目标,移相器技术是电调技术的核心。

移相器是一个通用的微波器件。按照电路类型的不同,移相器可分为模拟移相器和数字移相器。最早的移相器应用于雷达系统中,是由 Fox 于 1947 年提出的,它通过旋转圆波导里面的介质片来改变信号的传输相位^[5]。1966 年,Hansen 等人提出了一种 U 型滑动结构,如图 1 所示^[6]。该移相器通过改变传输线的物理长度来实现信号传输相位的改变,而且巧妙地利用了 $1/4$ 波长段实现物理上的隔离和电气上的连接。20 世纪 60 年代,半导体技术的发展催生了数字移相器的问世。随后,数字移相器就成为学者们的研究热点。进入 20 世纪 90 年代,移动通信技术得到飞速发展,基站天线研究人员借鉴雷达天线的波束扫描技术,使用移相器对天线垂直面进行电调下倾。但是,数字移相器成本太高,设计复杂,互调性能差,机械式模拟移相器开始应用于基站天线,并逐渐成为业界的重点与热点。

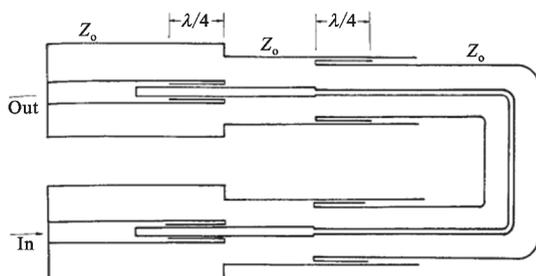


图 1 文献[6]中提出的移相器

Fig. 1 Phase shifter proposed in Reference [6]

基站天线工程中应用的移相器均分为两大类:第一类是物理长度可变移相器,第二类是介质滑动型移相器。物理长度可变移相器通过改变信号传输途径的物理长度来改变相位,它在实现方式上有两种结构:一种是弧形结构,由德国 Maximilian Gottl 等人在 1999 年提出,如图 2 所示^[7];第二种是字母 U 形结构,该结构是受文献[6]的设计理念启发而设计完成,如图 3 所示^[8]。介质滑动型移相器通过改变传输线的等效介电常数来改变相位,率先由 Per-Anders Arvidsson 等人于 1996 年提出,如图 4 所示^[9]。后续的工程师们在这些设计的基础上进行了一系列的改进^[10-11]。目前,这两类移相器基本满足了基站天线的需求,而下一步的研究重点和突破点应该放在移相器的小型化、宽带化和低成本上。

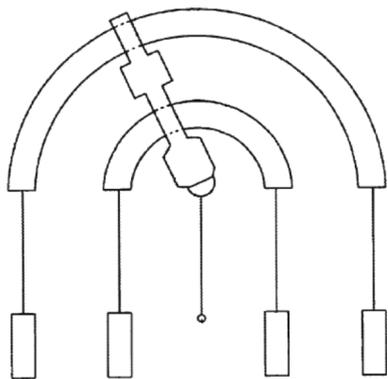


图 2 弧形移相器
Fig. 2 Curve phase shifter

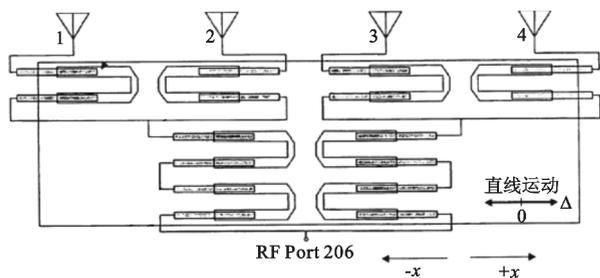


图 3 U 型滑动移相器
Fig. 3 U type sliding phase shifter

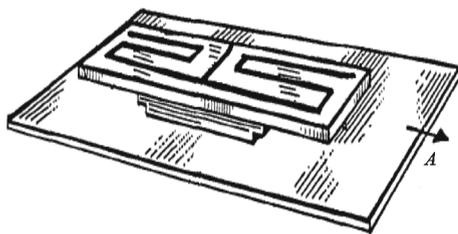


图 4 介质滑动型移相器
Fig. 4 Medium sliding type phase shifter

2.2 极化技术

极化表征的是在空间给定点上电场强度矢量的取向随时间变化的特性,用电场强度矢量的端点随时间变化的轨迹来描述。天线极化分为线极化、圆极化和椭圆极化。通常基站天线采用线极化,其定义为电磁波中电场分量相对于地面的方向,主要包括水平极化、垂直极化、 -45° 极化和 $+45^\circ$ 极化。单极化基站天线一般采用垂直极化,双极化多采用 $\pm 45^\circ$ 极化。双极化天线是将两个极化互相正交的天线封装在同一个天线罩内,能抗多径衰落,提高漫游切换能力和提高通话质量,增加系统容量;同时,它能实现小型化,节省天线数量,降低机械承载,便于安装,并使基站布局更加合理、基站站址选定更加容易^[12]。由于具有众多优点,双极化天线被广泛应用于移动通信系统中。

双极化技术是分集接收技术中的一种。1972年, Lee 和 Yeh 将极化技术应用在移动无线通信中^[13]。移动通信领域中关于极化技术比较典型的理论模型是由 Kozono 于 1984 年提出的^[14]。后续有许多研究者提出了多个理论,并在本世纪初期取得实际成果,并得到广泛应用^[15-16]。

在工程中,实现基站天线的双极化较为容易,只要保证天线辐射单元的电流方向与地面成 $\pm 45^\circ$ 即可。双极化技术的难点在于如何提高天线的极化隔离度和交叉极化比。常用的方法有采用高隔离度的辐射单元、反向馈电技术、增大馈线间隙、去耦合装置等。

虽然目前双极化技术已经非常成熟并被广泛应用于基站天线中,大多数的工程研究人员经常忽略此技术的重要性,但是,三极化技术却给人们带来了新的希望和研究重点。虽然经典电磁场理论表明,在电磁场传播方向上的极化是无法利用的,但由于散射的存在,在接收端仍然可接收到该极化的信息。因此,相比于传统的双极化技术而言,三极化技术可以提供 3 倍的信息容量^[17],这为目前频谱资源严重匮乏的现状提出了新的思路和解决办法。因此,工程研究人员应该重新重视极化技术的研究,尽管三极化技术在实际应用中还有许多难点未解决。

2.3 宽带技术

随着 3G 和 LTE 技术的普及,移动通信的宽带技术成为学者及工程师们又一个关注的重点:首先,宽带技术具有大容量、高速率、低功耗等优点;其次,基站天线使用宽带技术可以实现多系统共站,多系统共天线,以解决站址资源稀缺问题;最后,基站天线使用宽带技术可以降低运营商布网成本。

纵观全球的移动通信网络,移动通信使用的频段集中在低频段 698 ~ 960 MHz 和高频段 1 710 ~ 2 690 MHz,这些频段的相对带宽可达 31.6% 和 44.5%,属于超宽带的范围。因此,宽带技术是基站天线领域的一大挑战,也是基站天线研究中的一大难点。

在基站天线领域,对宽带技术的研究主要集中在对辐射单元的研究,这也是实现宽带化技术最有效的方法。基站天线辐射单元主要使用组合的对称振子。基站天线辐射单元在具体应用中有两种结构:一种是使用 4 个半波对称振子组成口字形,该结构主要应用低频段(低于 1 GHz,下同),如图 5 所示^[18];另一种是使用 2 个半波对称振子交叉组合,该辐射单元的辐射臂形状可以是正方形或者圆形

等,主要应用在高频段(高于 1 GHz,下同),如图 6 所示^[19]。

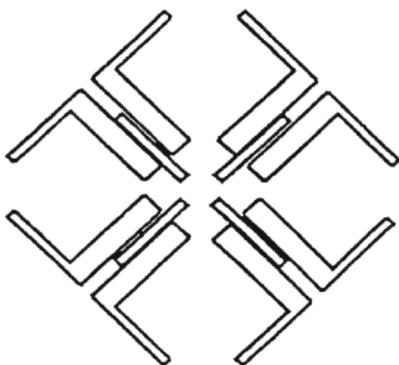


图 5 低频段辐射单元
Fig. 5 Low frequency radiation unit

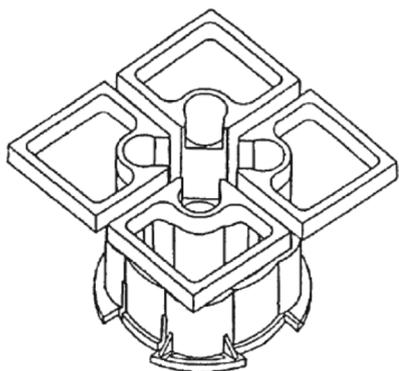


图 6 高频段辐射单元
Fig. 6 High frequency radiation unit

图 5 所示的辐射单元是最早应用于移动通信领域的低频段双极化组合单元,其口径较大,不利于基站天线的小型化,因此,研究人员又在此基础上进行改进,在不改变极化方式的前提下,通过将辐射臂向口内弯曲,减小辐射单元口径^[20]。图 6 所示的领结形振子是目前被广泛应用的高频段辐射单元。该辐射单元的雏形最早由 Lodge 于 1898 年提出。1939 年, Carter 在 Lodge 提出的天线基础上改进了馈电方法,首次在辐射单元和传输线之间使用一种渐变的过渡性馈电性结构。2003 年, Manfred Stolle 在前人的基础上提出了图 6 所示的商业化领结形辐射单元。后续的设计者也对辐射臂进行了一系列的改进,提出了多种形状的辐射单元。

实现辐射单元宽带化的方法大致可分为两类:第一类是延长电流有效流动路径,通过应用粗导体结构、渐变结构、折弯结构、开槽技术、分形技术等实现;第二类采用加载技术来实现,如金属片加载和介质加载等。除此之外,还可通过改变馈电方式、增大

基板厚度、降低基板相对介电常数等方法来实现宽带化。归根结底,实施这些技术的目的是为了辐射单元辐射出去的电磁波不再返回,因此,工程上应该尽量采用第一类方法,因为其他方法会使辐射出去的电磁波产生损耗,降低辐射单元的辐射效率。

2.4 阵列天线多频技术

由于移动通信网络的不断演进以及各个国家与地区使用的通信频段有差异,因此目前全球布网使用的频段较多,频谱资源散乱。为解决这一问题,宽带化是首选方法之一。然而,宽带天线无法实现各个频段独立电调,不利于网络的精细化布置。在此背景下,多频独立电调技术应运而生,并成为研发人员关注的重点之一。

多频独立电调基站天线作为集成度很高的天线,在电气性能和结构设计上均有很高的要求。目前国内外对多频独立电调基站天线的设计有两种形式:肩并肩(Side by Side)式和嵌套式。由于单频基站天线的研究较早并且技术相对比较成熟,该天线的辐射单元形式较多,性能较为优异。在阵列天线多频技术肩并肩方案中,直接将普通单频基站天线的振子单元用于多频基站天线的设计,以缩短天线的设计周期,减小成本。肩并肩式就是在同一块底板上,放置多列不同频段的辐射单元,如图 7 所示^[21]。由于目前网络覆盖均采用蜂窝小区方式,在实际工程应用中,为便于网络优化并获得均匀的信号覆盖,要求同一副天线中不同频段的最大辐射方向一致,也就是要求一副基站天线中各频段的最大辐射方向在基站天线的中线上。显然,肩并肩式的每列天线的轴线与底板中线不重合,因此,肩并肩式天线在实际应用中有一定的局限。嵌套式方案能够很好地解决这种局限:该方案将高频段辐射单元放进低频段辐射单元的口径内,以达到两个频段阵列天线的轴线均与天线中线重合,并且该方案可以大幅度缩小天线的体积,是目前实现多频独立电调基站天线小型化的主要方法,如图 8 所示^[22]。由于嵌套式方案中高低频段的辐射单元相距太近,两者之间的互耦效应较为明显,这就导致嵌套式天线的电气性能较肩并肩式差,因此,减小不同频段天线间的互耦又成为嵌套天线研究的重点及难点。同时,基站天线的小型化技术,必须考虑辐射单元几何尺寸尽可能小,也不可避免地增加了辐射单元直接的耦合,减小不同频段天线间的互耦十分重要。

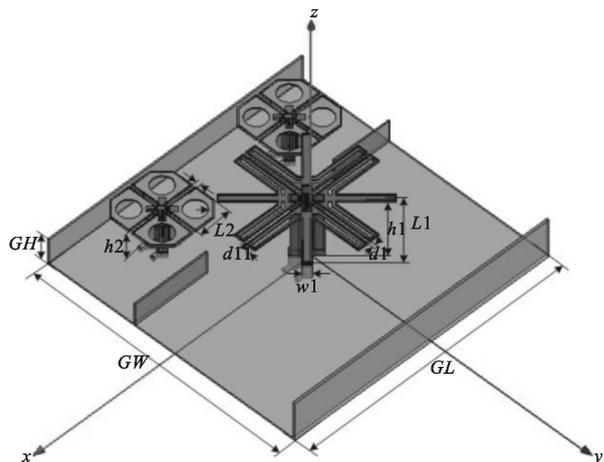


图 7 肩并肩方式
Fig. 7 Side by side mode

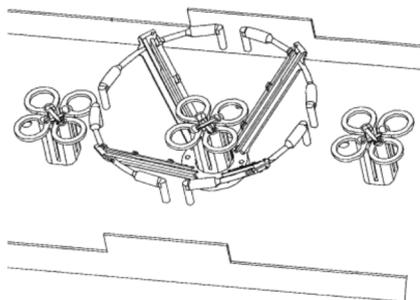
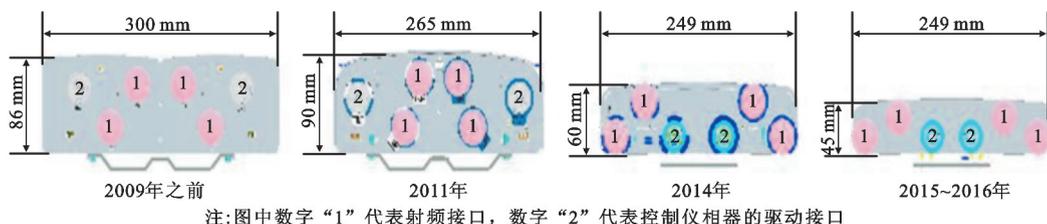


图 8 嵌套方式
Fig. 8 Nesting mode



注:图中数字“1”代表射频接口,数字“2”代表控制仪相器的驱动接口

图 9 京信通信公司在基站天线小型化方面的研究进展
Fig. 9 Research progress of Comba in base station antenna miniaturization

在无线通信技术发展初期,为实现远距离传输,当时使用的工作波长均长于 1 000 m,导致初期的天线体积庞大,不易安装,成本昂贵,使得天线的小型化技术被学者和工程师广泛关注,并且成功开发了许多小型化天线。1947 年,Wheeler 首次对小型天线进行了定量评估^[23],开创了天线小型化理论研究先河。天线小型化设计的重要理论由 Chu 于 1948 年提出的^[24]。根据 Chu 理论,天线的电尺寸减小,其品质因数增大,带宽变窄,天线的整体性能出现恶化。因此,从某种意义上讲,实现天线的小型化是不可能的。但是,在实际天线的研究设计中,可以通过一系列方法和技术的结合使天线的品质因数逼近理论下限,在很大程度上改善了天线的性能。这些方

为减少互耦,可以采用优化天线边界、开发适合多频组阵的辐射单元、合理利用立体空间以增加辐射单元之间的间距、采用合理的加载技术等方法来解决。

2.5 基站天线小型化技术

目前,布网所需求的多频独立电调基站天线能满足多系统共站、多系统共天线的需求,还能提高网络质量,节省布网成本,然而,天线的重量及风载荷对天线的小型化提出了要求。首先,小型化天线能够有效减少天线重量,使其便于安装与维护;其次,通过减小其风载荷,能降低环境因素对网络覆盖的影响;第三,小型化天线易于实现基站集成化,可降低成本,提高系统容量及性能;第四,小型化天线可以减小居民对电磁污染的恐惧,降低物业协调难度,节省租金。因此,运营商对小型化基站天线有迫切需求,也激励了全球天线厂家增加在小型化方面的投资比重,并且取得了很大的进步。图 9 展示国内天线厂家京信通信近年来在基站天线小型化方面的研究进展,可以看出,基站天线端盖截面尺寸随着时间的推移在逐步减小。

法与技术可以分为两大类:常规实用类和新材料技术。

2.5.1 常规实用类

该类主要着眼于实际应用,从常规基站天线入手,使用新方法与新技术,从天线的辐射单元、馈电网络、反射板三个方面来实现基站天线的小型化。

(1) 辐射单元的小型化

基站天线基本采用半波阵子,其尺寸大小与天线的频率参数相关,因此,想要大幅度减小辐射单元的尺寸有很大难度。但是,在保证天线性能的前提下,通过一些方法尽可能减小辐射单元的尺寸:首先,尽可能利用空间来延长电流路径,如采用折弯技术、开槽技术和分形技术等;其次,采用加载技术,如

介质加载和金属加载等;最后,对于印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)辐射单元,可采用特殊材料基片以实现小型化。

(2) 馈电网络的小型化

基站天线的馈电网络包括传输线、功分器和移相等部件。传输线有微带线和同轴线两类,虽然微带线因为有体积小、重量轻、焊接安装便捷等优点非常利于实现小型化,但是由于其损耗大、互调差等诸多不利因素,导致微带线在馈电网络应用较少,而业界应用较多是同轴线。功分器和移相器是实现馈电网络小型化的主角。目前,业界使用的功分器和移相器主要是微带线,主要通过采用特殊基片材料或者增加基片的介电常数来实现小型化,还可以使用加载技术,以克服微带线自身的缺点。

(3) 反射板的小型化

基站天线基本都是定向天线,因此反射板是不可或缺的部件。反射板的尺寸对天线的性能有很大的影响。反射板的长度由辐射单元数及其间距决定,辐射单元数和间距由天线的增益和天线垂直面波束赋形来决定,所以,是否需要减小反射板长度则由系统需求决定。反射板的宽度直接影响天线的前后比和水平面波束宽度等辐射指标。一般而言,反射板宽度的减小会导致天线水平面波束宽度变宽、前后比变差、增益下降等问题。因此,只有采用小型化的辐射单元和创新性的边界,才能实现反射板的小型化。

2.5.2 新材料技术类

常规实用类小型化方法虽然目前在工程上得到了广泛应用,但是,受电磁耦合和辐射要求限制,天线尺寸减小幅度有限,而且天线尺寸的减小往往导致其性能恶化,不能满足运营商布网要求,使得开发新材料技术成为实现基站天线小型化的新途径。新材料技术主要包括左手材料和介质天线。

(1) 左手材料

左手材料中电场强度、磁场强度和波矢量服从“左手定则”,与常规材料服从的“右手定则”不同,由此得名。左手材料又称“双负材料”,这是由于其介电常数和磁导率均为负值。2002年,Engheta将左手材料应用到天线小型化领域。Engheta将左手材料和常规材料组合,制作成小于半波长的谐振腔,并对其进行理论推导,证明了左手材料在谐振腔小型化领域应用的可行性。由于微带天线可以看成谐振腔,可以通过在微带天线的基板中加入左手材料以实现天线的小型化。

(2) 介质天线

介质的存在会影响电磁波的传播特性,介质天线便根据这一原理制作而成。介质天线是一根用低损耗高频介质材料(一般用聚苯乙烯)作成的圆棒,在圆棒的一端采用同轴线或波导馈电。介质天线有众多优点,如天线尺寸小、辐射效率高、带宽较宽等,尺寸小是介质天线的最大优势。这是由于电磁波在高介电常数介质中传输,波长较在真空中短,使得介质天线可以大幅度减小天线的几何尺寸。介质天线是天线小型化的一个崭新的研究方向,得到了学术界和工业界的广泛关注。

传统实用类方法只能小范围内实现天线整体的小型化,因此,研究重点还应该放在新技术和新材料上。只有这样,才能在基站天线小型化技术上实现历史性的突破。

除上述小型化方法外,还可以利用基站天线多种关键技术的组合,例如:极化技术与宽带技术中的振子相组合、阵列天线多频技术中的嵌套方案等,实现基站天线的小型化。

3 结束语

基站天线电调技术的研究方向主要是实现移相器的宽带化、小型化和低成本。极化技术的关注点在于提高隔离度和交叉极化比以及实现宽带化。除此之外,也应该重点关注三极化的开发和应用。宽带技术是移动通信系统的基础技术,目前研究重点集中在天线辐射单元的宽带性能优化上。阵列天线多频技术受到运营商的追捧,是目前的研究热点,但该技术的瓶颈是辐射单元小型化及多频天线组合的性能优化。小型化技术是目前的研究重点,工程中应用的常规小型化方法有很大的改进空间。此外,新材料技术成为基站天线小型化技术新的发展方向,如左手材料和介质天线等,应给予重点关注。综上所述,基站天线的5个关键技术并非单个独立发展,而是相互关联,交叉共存。电调技术和阵列天线多频技术主要实现宽带化、小型化;极化技术体现了集成化,是小型化的又一种表现;宽带技术建立在辐射单元双极化的基础上,未来还需要发展三极化的宽带技术;基站天线小型化技术包含诸多传统技术,新材料技术是新的研究趋势。所以,在基站天线实际开发设计中,需要将多个关键技术完美结合在一起,不能片面地应用其中某一种技术。从目前运营商布网需求的基站天线来看,小型化多频天线是需

求热点,因此,小型化技术和阵列天线多频技术将成为基站天线发展最关键的技术。

参考文献:

- [1] 工信部运行监测协调局. 2015 年通信运营统计公报 [EB/OL]. (2016-01-21) [2016-05-16]. <http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057511/n3057518/c4609344/content.html>.
- [2] 卜斌龙,林学进. 网络对天线的需求及相关新技术[J]. 电信技术,2012(S2):60-66.
BU Binlong, LIN Xuejin. Demand and related technologies of the antenna on the network [J]. Telecommunication Technology, 2012(S2):60-66. (in Chinese)
- [3] 陈胜兵,焦永昌,张福顺,等. 蜂窝移动通信基站天线技术研究进展[J]. 西安电子科技大学学报,2003,30(6):792-797.
CHEN Shengbing, JIAO Yongchang, ZHANG Fushun, et al. Advance in base station antenna techniques for cellular mobile communications [J]. Journal of Xidian University, 2003,30(6):792-797. (in Chinese)
- [4] 李煦,李耀焕. 基站天线的发展与应用[J]. 电信技术,2011(12):55-57.
LI Xu, LI Yaohuan. Development and application of Base Station Antenna [J]. Telecommunications Technology, 2011(12):55-57. (in Chinese)
- [5] FOX A G. An adjustable wave-guide phase changer [J]. Proceedings of the IRE, 1947, 35(12):1489-1498.
- [6] HANSEN R C. Microwave scanning antennas [M]. Manhattan, NY: Academic Press, 1966.
- [7] KATHREIN-WERKE K G. High-frequency phase shifter unit having pivotable tapping element; US, 6850130 [P]. 2005-02-01.
- [8] Etenna Corporation. Low cost trombone line beamformer; 6831602 [P]. 2004-12-14.
- [9] ARVIDSSON P A, ANDERSSON S. Device for adjusting the beam direction of an antenna, and feed line structure therefore; 1996037922A1 [P]. 1996-11-28.
- [10] ZIMMERMAN M L, PASKE J, GIACOBazzi J, et al. Antenna System; 0135524 [P]. 2002-9-26.
- [11] 周竞科,褚庆昕. 一种新型的电调天线可变移相器方案[C] // 2005 年全国微波毫米波会议论文集. 北京:电子工业出版社,2005:338-341.
- [12] 席玉久. 频谱定义及频谱资源的特性[J]. 电子世界, 2000(4):53-54.
XI Yujiu. Spectrum definition and characteristics of spectrum resource [J]. Electronic World, 2000(4):53-54. (in Chinese)
- [13] LEE W, YEH Y. Polarization diversity system for mobile radio [J]. IEEE Transactions on Communications, 1972,

20(5):912-923.

- [14] SKOZON O, TSURUHATA H, SAKAMOTO M. Base station polarization diversity reception for mobile radio [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1984, 33(4):301-306.
- [15] 庄钊文,肖顺平,王雪松. 雷达极化信息处理及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [16] 张英浩. 变极化引信技术及双极化微带天线的研究[D]. 南京:南京理工大学,2005.
ZHANG Yinghao. Research on the technology of variable polarization fuze and dual polarized microstrip antenna [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- [17] 文首明. 基于电场的极化分集技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
WEN Shouming. Research on electric field based polarization diversity technique [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [18] KATHREIN-WERKE A G. Dual polarized multi-range antenna; 6333720B1 [P]. 2001-12-25.
- [19] KATHREIN-WERKE A G. Antenna having at least one dipole or an antenna element arrangement which is similar to a dipole; 6933906B2 [P]. 2005-08-23.
- [20] 京信通信系统(中国)有限公司. 宽频带环状双极化辐射单元及阵列天线; 2012101577568 [P]. 2012-10-10.
- [21] 江椿. 移动通信双频双极化基站天线设计[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
JIANG Chun. Design of dual-frequency dual-polarized base-station antennas for mobile communication [D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- [22] 京信通信系统(中国)有限公司. 宽频带环状双极化辐射单元及线阵天线; 2007100311443 [P]. 2009-05-06.
- [23] WHEELER H A. Fundamental limitation of small antennas [J]. Proceedings of the IRE, 1947, 35(12):1479-1484.
- [24] CHU L J. Physical limitations of omni-directional antennas [J]. Journal of Applied Physics, 1948, 19(12):1163-1175.

作者简介:



姬五胜(1968—),男,甘肃秦安人,2004年获博士学位,现为教授,主要研究方向为无线电技术与信息系统、微波电路三维集成、微波天线等;

Email: wshji1326@sohu.com

张丰臣(1989—),男,江苏赣榆人,2015年获硕士学位,主要从事移动通信基站天线的设计与开发;

刘培涛(1977—),男,山东德州人,2005年获硕士学位,现为工程师,主要从事移动通信基站天线的设计与开发。