



支持未来全频谱接入通信的基站天线研究综述

何业军, 黄伟, 陈亚玲, 张龙, 李文廷

Review of base station antennas for future all-spectrum-access communications

HE Yejun, HUANG Wei, CHEN Yaling, ZHANG Long, and LI Wenting

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2022144>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于数字超表面的低剖面波束控制天线

A low profile beam controlling antenna based on digital metasurface

电波科学学报. 2021, 36(6): 938-946

一种基于超表面的方向图可重构天线

A pattern reconfigurable antenna based on metasurface

电波科学学报. 2021, 36(6): 918-924

一种新型多层PCB多频段电场测量传感天线

A novel multi-band sensing antenna for electric field measurement with multi-layer PCB layout

电波科学学报. 2019, 34(4): 536-543

磁电偶极子天线的极化可重构研究(特邀文章)

Developments on polarization reconfigurable magneto-electric dipole antennas(Invited)

电波科学学报. 2018, 33(3): 287-292

基于超材料的多波段小型化天线

Design of the multi-band and miniaturized antenna based on metamaterial

电波科学学报. 2017, 32(6): 735-741

天基地震电磁前兆研究综述

Review of the earthquake electromagnetic precursor research based on ground and space observations

电波科学学报. 2018, 33(1): 105-115



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

何业军, 黄伟, 陈亚玲, 等. 支持未来全频谱接入通信的基站天线研究综述(特邀文章)[J]. 电波科学学报, 2023, 38(1): 15-26+43. DOI: 10.12265/j.cjors.2022144

HE Y J, HUANG W, CHEN Y L, et al. Review of base station antennas for future all-spectrum-access communications(Invited)[J]. Chinese journal of radio science, 2023, 38(1): 15-26+43. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2022144

支持未来全频谱接入通信的基站天线研究综述 (特邀文章)

何业军* 黄伟 陈亚玲 张龙 李文廷

(深圳大学电子与信息工程学院, 深圳 518060)

摘要 随着移动通信系统的快速更新迭代,使用的频段也越来越丰富,支持全频谱接入通信成为未来基站天线的发展趋势.而日趋紧张的站址资源对未来基站天线的小型化水平提出了更高的要求.文章首先介绍了当前多频段基站天线的研究进展和成果,概括了并排式、交错式、堆叠式和嵌套式四种多频段结构类型,着重分析了异频耦合的产生原理和抑制方法;然后总结出共口径技术和异频解耦技术是未来全频谱基站天线的关键技术;最后阐述了当前共口径技术和异频解耦技术存在的局限性,展望了未来全频谱基站天线的研究方向,包括多种共口径方式组合技术、宽带异频解耦技术和大规模共口径天线阵列解耦技术.

关键词 基站天线;多频天线;共口径天线;异频耦合;去耦技术

中图分类号 TN821

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2023)01-0015-12

DOI 10.12265/j.cjors.2022144

Review of base station antennas for future all-spectrum-access communications (Invited)

HE Yejun* HUANG Wei CHEN Yaling ZHANG Long LI Wenting

(College of Electronics and Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract With the rapid update of mobile communication system, more and more frequency bands are employed, so the all-spectrum-access communications become the development trend of base station antenna in the future. However, the ever-decreasing site resources require more miniaturized base station antenna. First, this paper introduces the current research advances and achievements on multi-band base station antenna, summarizes four types of multi-band structures: side-by-side, interleaved, stacked and embedded schemes, and focuses on analyzing the principle and suppression method of cross-band coupling. Then, it is concluded that share-aperture structure and cross-band decoupling technologies are the key for future all-spectrum base station antenna. Finally, the limitations of the current share-aperture schemes and cross-band decoupling technologies are expounded. And the future research directions of full-spectrum-access base station antennas are prospected, including the combination technologies of various share-aperture structures, broadband cross-band decoupling and the decoupling methods for massive share-aperture antenna array.

Keywords base station antenna; multi-band antenna; share-aperture antenna; cross-band coupling; decoupling method

收稿日期: 2022-06-29

资助项目: 国家自然科学基金(62071306, 61801299, 62101341)

通信作者: 何业军 E-mail: heyejun@126.com

引言

由于用户群体的快速增长和通信业务的不断丰富,移动通信系统在提升信道容量和数据传输速率上面临着前所未有的挑战.在过去的二十多年里,移动通信技术飞速发展更新迭代,完成了从2G到5G的演变.然而,为了满足不同情景的需求,在未来很长的一段时间里5G与前几代的移动通信系统将会继续共存^[1-2].因此,基站天线需要同时支持多个移动通信制式和频段.例如2G移动通信系统的GSM900和GSM1800分别使用825~960 MHz频段和1 710~1 920 MHz频段.3G系统的TD-SCDMA, WCDMA和CDMA2000在1 880~2 170 MHz频段中运行.4G的LTE系统主要工作在2 300~2 690 MHz频段.5G系统的工作频段分为两部分,FR1和FR2,FR1频段定义为450~6 000 MHz,即Sub-6 GHz频段;FR2频段定义为24 250~52 600 MHz,该频段的波长量级在10 mm左右,也被称为5G毫米波频段.现阶段5G基站的部署主要是在Sub-6 GHz频段范围内,包括700 MHz、2.1 GHz、2.6 GHz、3.5 GHz和4.9 GHz频段.移动通信的快速发展导致低频段的频谱资源日趋紧张,于是人们将目光投向了频率更高的毫米波频段.5G毫米波频段拥有丰富的频谱资源和更大的带宽容量,能够达到数千Mbps的超高传输速率和1 ms级别的极低时延.但是,毫米波存在严重的传输衰减大、穿透能力差和覆盖范围小等问题.针对这些问题与挑战,将衰减小、覆盖广的Sub-6 GHz天线与毫米波天线集成在一起,是5G基站天线的发展趋势^[3-5].

随着越来越多的频谱加入,与之而来的是基站天线系统冗杂、站址占用空间大、安装维护成本高等问题^[6].共站共享方案的实施,对基站天线的小型化水平提出了更高的要求.因此,研究小型化、集成化的多频段基站天线成为未来移动通信系统的迫切需求.

1 多频段基站天线原理及分类

多频段基站天线,即多种不同频段的的天线集成在同一副基站天线阵列里,且各频段天线的辐射性能和电磁参数正常,互不影响^[7].如图1所示,根据不同的高低频天线阵元组合结构方案,多频段基站天线大致可以分为四种类型:并排式、交错式、堆叠式以及嵌套式.

并排式多频段基站天线将不同频段的的天线阵元按照一定的间距并列排布,各频段阵元之间的耦合

强度较小,但是天线阵列整体宽度较大.进一步缩小并排的高低频阵元之间的距离,直至高低频阵元在空间上交错重叠时,即为交错式多频段基站天线.相比并排式结构,采用交错式结构的多频段基站天线宽度减小,但是耦合更加严重,同时低频天线还会遮挡高频天线的辐射,造成散射干扰.堆叠式方案将高低频阵元上下堆叠放置,最大程度地减小了多频段基站天线的整体宽度.根据高低频阵元的位置,可以分为高上低下和低上高下两种类型.然而高上低下结构存在剖面高度过高的问题,低上高下结构面临着严重的散射干扰.嵌套式多频段基站天线将高频阵元嵌套在低频阵元内部,低频天线的尺寸即为天线的整体尺寸,是这四类结构里空间利用率最高的一种方案.但是,采用嵌套式结构的高低频段阵元排布最为紧密,耦合影响也是最严重的.

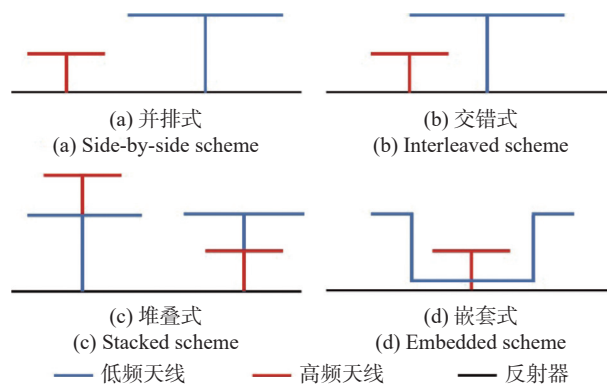


图1 多频段基站天线结构类型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-band base station antennas

交错式、堆叠式和嵌套式的多频段基站天线属于共口径天线范畴.共口径技术是指不同频段的的天线阵元按特定的结构紧密组合,共享部分或者全部辐射口径,并且在各自的频段内正常工作,互不干扰^[8-16].与传统的并排式结构相比,共口径方案可以大幅提高多频段天线的辐射口径利用率,减小尺寸,进一步提升基站天线的小型化水平.然而,多频段基站天线阵元之间因排布紧密而产生强烈的耦合效应,耦合干扰将严重影响天线的整体性能,引起天线端口隔离度恶化和方向图畸变等问题^[17-23].因此,研究小型化集成化的多频段基站天线的解耦技术是重中之重.

2 国内外研究现状

随着移动通信技术的快速发展,基站天线朝着多频带、小型化方向发展.近年来,国内外的学者和研究团队在多频段基站天线领域做了大量研究.

2.1 并排式多频段基站天线

并排式多频段基站天线将不同频段的的天线阵元

按照一定的间距并列排布,间距越大,则各频段阵元之间的耦合强度越小,但是天线整体宽度也随之增加.为了满足基站天线小型化的需求,降低并排式多频段基站天线的整体宽度,只能减小高低频阵元之间的距离.然而,随着高低频阵元的靠近,耦合影响却更加严重.

为了抑制耦合,降低并排式多频段基站天线的宽度,华南理工大学的章秀银教授团队在 2016 年提出了一种基于滤波贴片天线阵元的双频段基站天线^[24].如图 2 所示,该滤波贴片天线阵元由上下两层印制在介质基板的矩形贴片组成.位于下层的驱动贴片由同轴馈电探针激励,然后通过耦合效应激励悬空在上层的寄生贴片.为了集成滤波功能,底层介质基板中添加了三个短路通孔,用于抑制工作频带外的辐射.在驱动贴片上蚀刻的 E 形槽用于引入新的谐振模式,拓展天线的阻抗带宽.基于此结构分别设计了工作频段为 DCS (1 710~1 880 MHz) 和 WCDMA(1 920~2 170 MHz) 的两个阵元并排放置,仿真和实测结果如图 3(a) 所示.图 3(b) 是采用不带滤波结构功能的普通贴片阵元的仿真结果.相比之

下,滤波贴片天线阵元实现了较高的带内辐射效率和带外辐射抑制水平,端口隔离度从 22 dB 提升至 30 dB.基于滤波贴片天线阵元构建的 DCS 和 WCDMA 双频段基站天线阵列宽度为 206 mm,比常规工业产品减小了约 84 mm.

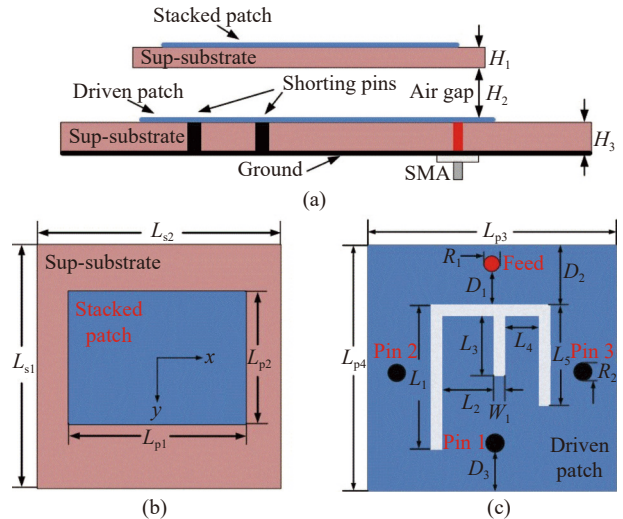
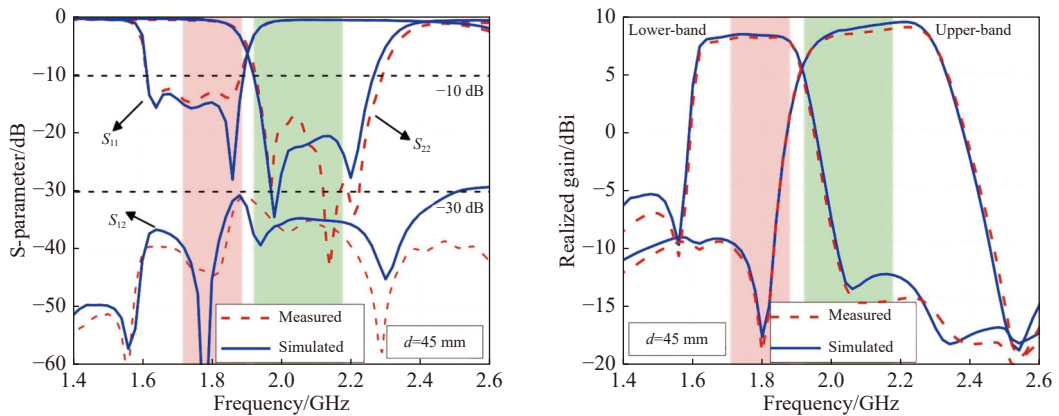
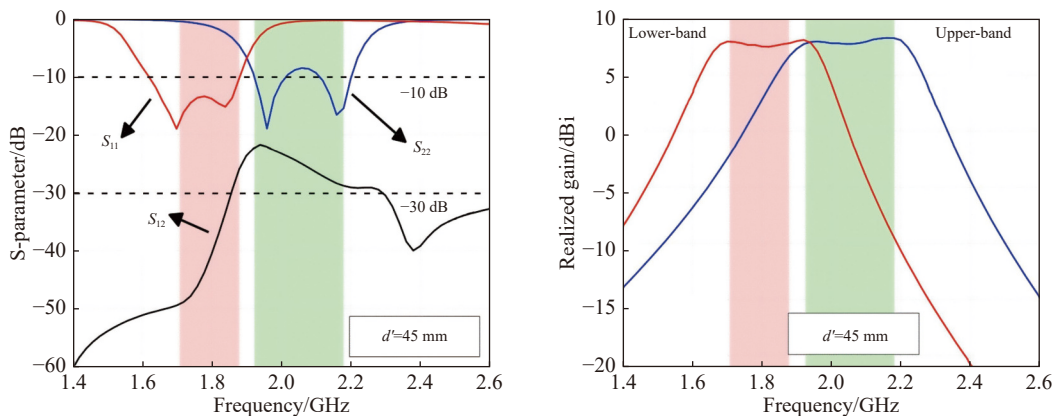


图 2 滤波贴片天线阵元^[24]

Fig. 2 The filtering patch antenna element^[24]



(a) 滤波贴片天线的 S 参数和增益
(a) S-parameters and gain of filtering patch antenna



(b) 非滤波贴片天线的 S 参数和增益
(b) S-parameters and gain of non-filtering patch antenna

图 3 滤波贴片天线与非滤波贴片天线的结果对比^[24]

Fig. 3 Comparison of filtering patch antenna and non-filtering patch antenna^[24]

2018 年, Li 等人提出了一种基于人工磁导体 (artificial magnetic conductor, AMC) 反射器与陷波偶极子 (band notch dipole, BND) 的 DCS/WCDMA 双频段基站天线^[25]. 如图 4 所示, 两个频段的的天线阵元并排放置. 偶极子的两条臂分别印制在介质基板的正反两侧, 每条臂上蚀刻了曲折的槽缝, 用于抑制带外辐射增益, 缓解异频天线阵元间的耦合影响. 与传统的金属反射器相比, AMC 反射器的引入降低了天线的剖面高度. 采用传统金属反射器时, 陷波偶极子的高度为五分之一的中心频率波长. 引入 AMC 反射器可以将高度降低至十分之一的中心频率波长, 节省了一半的尺寸.

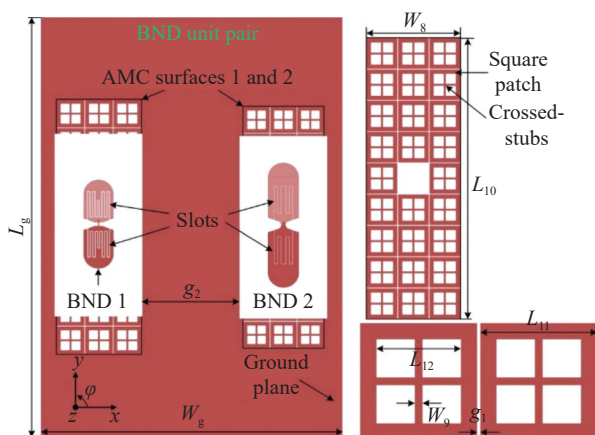
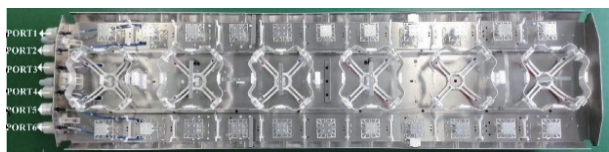


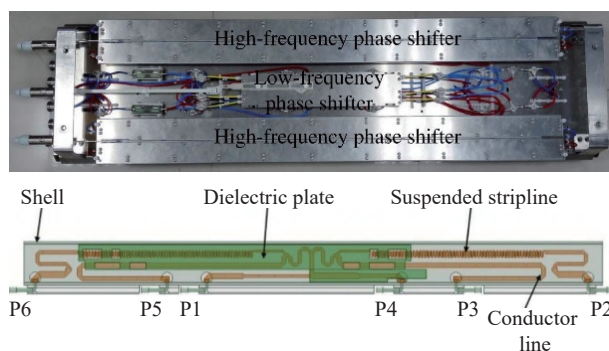
图 4 基于 AMC 反射器与 BND 的双频基站天线^[25]

Fig. 4 Dual-band base station antenna using BND and AMC reflector^[25]

针对日益扩大的频谱覆盖范围需求, 深圳大学何业军教授团队在 2021 年提出了一种工作于 698~960 MHz 和 1 710~2 690 MHz 的双宽频带并排式基站天线^[26], 能够覆盖 GSM900/GSM1800、TD-SCDMA/WCDMA/CDMA2000、LTE2300/LTE2600 以及 700 MHz 频段. 天线由高低频阵元和移相器组成, 如图 5 所示. 移相器由介电滑片和印制在介质基板上的传输线组成. 通过移动介电滑片的位置, 可以改变传输线的介电常数, 控制各端口的相位变化, 从而实现基站天线阵列垂直面方向图 $0\sim 10^\circ$ 的下倾角调节. 该天线通过 Kaelus 无源交调测试仪测得在所有频段的三阶互调均大于 115 dBm.



(a) 正面阵元排布
(a) Front element arrangement



(b) 背面馈电网络和移相器结构
(b) The feed network and phase shifter on the back

图 5 双宽频带双极化并排式基站天线^[26]

Fig. 5 The dual-broadband dual-polarized side-by-side base station antenna^[26]

2.2 交错式多频段基站天线

交错式多频段基站天线是在并排式的基础上, 进一步缩小并排的高低频阵元之间的距离, 直至各自的辐射口径部分重叠, 因此也属于共口径天线. 高低频阵元之间的距离越小, 异频耦合影响势必更加严重. 此外, 交错式多频段基站天线的低频阵元会阻挡高频阵元的电磁辐射, 引发散射干扰, 导致高频阵元方向图畸变.

2019 年, 悉尼科技大学的 Y. Jay Guo 教授团队提出了一种加载扼流器抑制交错式多频段基站天线异频耦合的方法^[27]. 如图 6 所示, 该方法首先将低频阵元的辐射器分段截断, 减小散射截面. 然后在低频阵元截断处加载扼流器, 抑制高频阵元的散射干扰, 减小高低频阵元之间的耦合. 该交错式双频段基站天线的工作频带分别为 1.71~2.28 GHz 和 0.82~1.0 GHz.

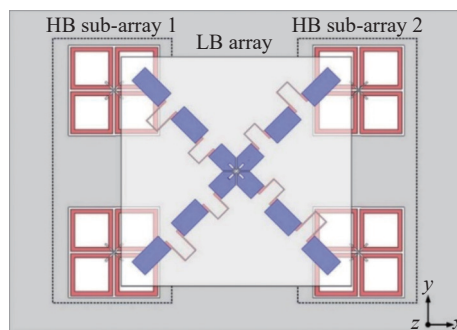


图 6 加载扼流器的交错式双频段基站天线^[27]

Fig. 6 Choke-loaded interleaved dual-band base station antenna^[27]

2021 年, 电子科技大学的杨仕文教授团队基于带通频率选择表面 (frequency selective surface, FSS) 设计了一种电磁透天线阵元作为交错式多频段基站天线中的低频阵元^[28], 缓解低阵元对高频阵元的

遮挡问题. 天线结构如图 7 所示, 工作频段为 1.8~2.7 GHz. 为了验证该天线阵元的电磁透明特性, 在其仿真模型下方添加了赫兹偶极子波, 用于模拟工作在 3.3 GHz 时的高频阵元. 图 8 结果显示, 传统结构的低频阵元严重阻塞了高频阵元的电场, 而采用电磁透明天线阵元时, 电场分布基本和低频阵元独立工作时一致.

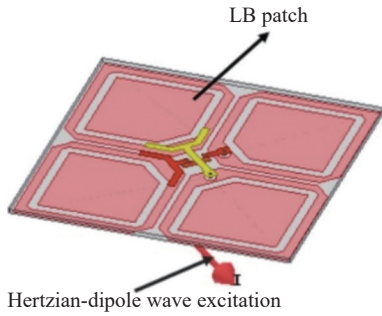


图 7 基于带通 FSS 的电磁透明天线阵元^[28]

Fig. 7 Electromagnetic transparent antenna element based on bandpass FSS^[28]

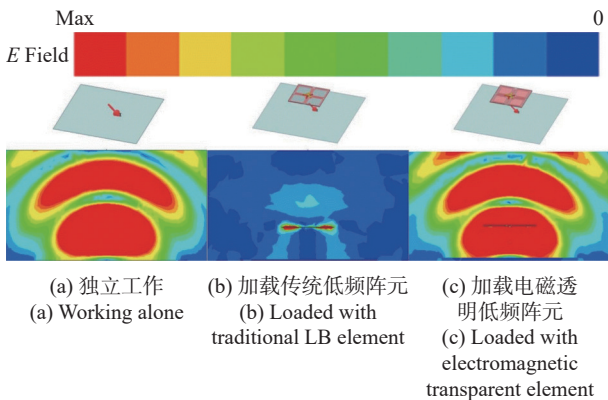


图 8 赫兹偶极子的电场分布^[28]

Fig. 8 The electric field distribution of the Hertzian dipole^[28]

2022 年, 深圳大学何业军教授团队提出了一种具有异频去耦功能的交错式双宽带基站天线^[29], 高低频工作带宽分别达到了 45.5% (1.7~2.7 GHz) 和 32.7% (0.69~0.96 GHz). 如图 9 所示, 低频阵元采用加载去耦枝节的“田”字形 $\pm 45^\circ$ 交叉偶极子, 尺寸为 $0.32\lambda_L \times 0.32\lambda_L \times 0.22\lambda_L$ (λ_L 为低频阵元的中心频率波长), 进一步提高了天线小型化水平. 为了验证设计, 分别仿真了高频阵元独立工作时、加载未去耦的传统低频阵元时, 以及加载去耦低频阵元时三种情形下的高频阵元电场分布和方向图. 图 10 结果显示, 加载传统低频阵元时, 由于异频耦合以及低频阵元遮挡, 高频阵元的电场分布受到了比较大的散射干扰. 而采用去耦低频阵元后, 高频阵元的电场分布得以恢复. 图 11 表明, 加载传统低频阵元时, 引发了高频阵元方向图的畸变; 而采用去耦低频阵元后, 高频

阵元的方向图与其单独工作时基本一致, 实现了方向图的保形.

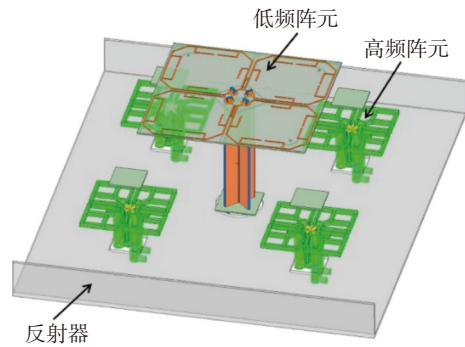


图 9 加载去耦枝节的交错式双宽带基站天线^[29]

Fig. 9 Interleaved dual-broadband base station antenna loaded with decoupling branches^[29]

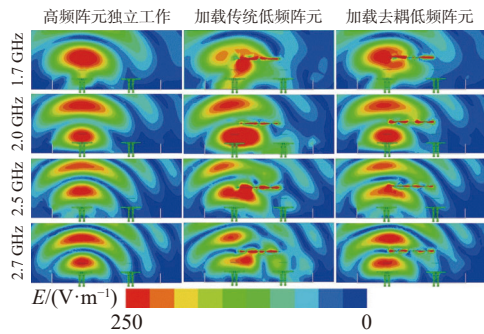
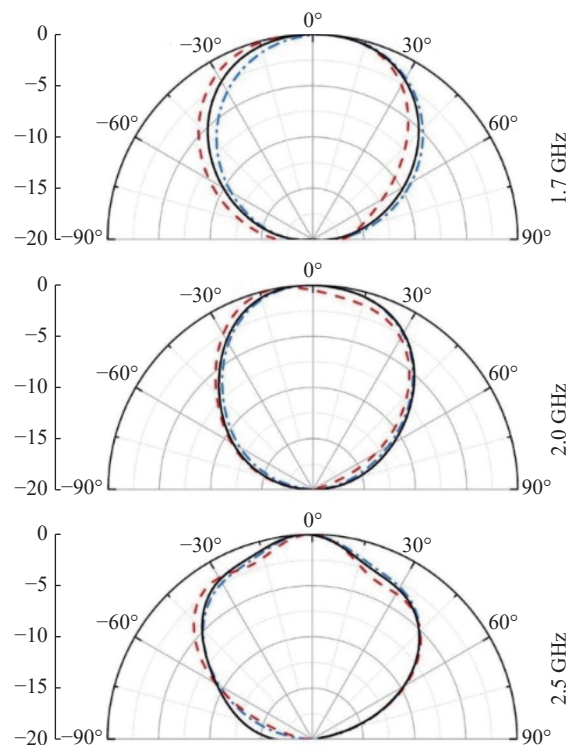


图 10 高频阵元电场分布去耦前后对比^[29]

Fig. 10 Comparison of higher-band element electric field distribution before and after decoupling^[29]



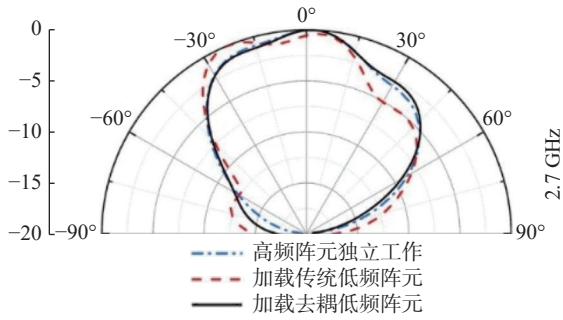


图 11 高频阵元方向图去耦前后对比^[29]

Fig. 11 Comparison of higher-band element radiation patterns before and after decoupling^[29]

华南理工大学的褚庆昕教授团队在 2022 年提出了一种集成三个频段阵元的交错式基站天线^[30], 结构如图 12 所示. 其中, 高频覆盖 3.4~3.6 GHz, 中频覆盖 1 710~2 170 MHz, 低频覆盖 790~960 MHz. 为了抑制中低频阵元对高频阵元的散射干扰, 在中低频阵元的辐射器上都蚀刻了凹形槽以降低其散射截面. 然后截断低频阵元的辐射器, 并在截断处加载扼流器以减小低频阵元对中频阵元的散射干扰. 此外, 当低频阵元工作时, 中频阵元的巴伦在低频阵元的工作频段内产生共模谐振, 导致低频阵元的辐射模式失真, 称为共模干扰. 为了抑制共模干扰, 在中频阵元的巴伦底部引出一段金属带然后接地, 通过调节金属带的长度将产生共模谐振的频率移到低频阵元的工作频段之外.

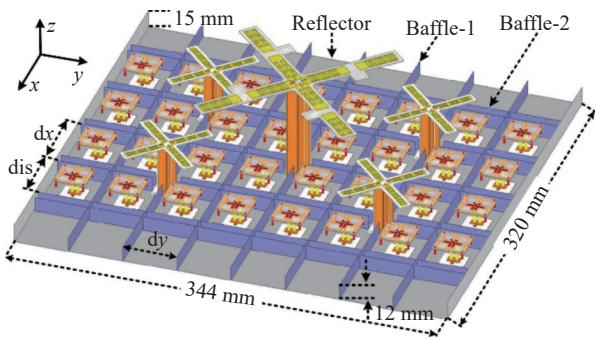


图 12 交错式三频段基站天线^[30]

Fig. 12 Interleaved tri-band base station antennas^[30]

2.3 堆叠式多频段基站天线

堆叠式多频段基站天线是将高低频阵元上下堆叠放置, 最大程度降低了天线的宽度尺寸. 根据高低频阵元的位置, 堆叠式多频段基站天线可以分为高上低下和低上高下两种结构. 在高上低下结构中, 高频阵元对低频阵元的遮挡基本可以忽略. 但是天线整体剖面高度是高频阵元高度和低频阵元高度的叠加, 必然导致天线整体剖面高度的大幅增加. 低上高下结构的堆叠式多频段基站天线虽然没有增加天线的整体剖面高度, 但是存在着比交错式多频段基站

天线更加严重的散射干扰. 因此, 如何降低天线整体的剖面高度, 抑制耦合干扰带来的影响, 是堆叠式多频段基站天线需要面临的关键问题与挑战.

基于高上低下结构, 电子科技大学杨仕文教授团队在 2019 年提出了一种低剖面的堆叠式双频段基站天线^[31], 工作在 690~960 MHz 和 3.5~4.9 GHz 频段. 如图 13 所示, 该天线将四个高频阵元放置在一个低频阵元的正上方, 高低频阵元之间添加了四块金属板. 这四块金属板既是高频阵元的地, 又是低频阵元的负载, 可以显著减小低频阵元的剖面高度. 最终, 该天线整体的剖面高度为 $0.17\lambda_L$ (λ_L 为低频阵元的中心频率波长). 为了进一步降低剖面高度, 抑制高低频阵元间的电磁耦合, 杨仕文教授团队在 2020 年引入了 FSS 和螺旋形同轴电缆馈电方案, 天线结构如图 14 所示^[32]. 引入的 FSS 对于下方的低频阵元 (B1) 呈现透射特性, 而对上方的高频阵元 (B2) 则是呈现反射特性, 其工作原理如图 15 所示^[33]. 同时, FSS 可以看作是低频阵元的负载, 将低频阵元的剖面高度降低至 $0.12\lambda_L$. 此外, 低频阵元工作时会在高频阵元的同轴馈线上引起共模电流, 共模干扰影响了低频天线的阻抗匹配和辐射性能. 为了抑制共模干扰, 将高频阵元的同轴馈电电缆弯曲成螺旋形状. 该螺旋形同轴馈电电缆在高频阵元的工作频段内呈现短路特性, 而在低频阵元的工作频段内呈现开路特性. 2022 年, 华南理工大学薛泉教授团队提出了一种基于超表面的堆叠式双频段基站天线^[34]. 如图 16 所示, 引入的超表面具有两种功能, 对于低频阵元是一个 AMC 反射器, 可以提升增益和降低剖面高度; 而对于高频阵元则是一个带通 FSS, 可以抑制散射干扰.

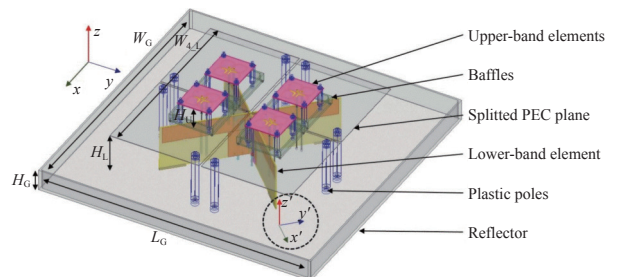


图 13 低剖面堆叠式双频段基站天线^[31]

Fig. 13 Low-profile stacked dual-band base station antenna^[31]

为了抑制低上高下结构多频段基站天线的耦合, 2021 年西安电子科技大学孙保华教授团队提出一种基于 FSS 的三频段基站天线^[35]. 如图 17 所示, 低频阵元的辐射器被设计为 FSS, 置于中高频阵元的正上方, 二者共用一个地. 其中, 低频阵元工作在 1 710~2 690 MHz 频段, 中高频阵元分别覆盖

3.28~3.80 GHz 和 4.75~5.18 GHz 频段. 基于 FSS 的低频阵元对中高频阵元呈现透射特性, 不会造成遮挡. 2022 年, 华南理工大学章秀银教授团队提出了一种由双层 FSS 构成的低频阵元, 用于低上高下堆叠式双频段基站天线^[36]. 如图 18 所示, 两层 FSS 分别印制在介质基板的上下两面, 高频阵元的工作频段在其通带范围, 因此对高频阵元呈现低散射特性. 同时, 该 FSS 也作为低频阵元的辐射器, 可以实现 9.1 dBi 的高增益.

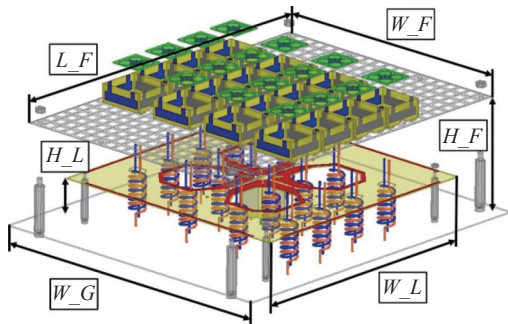


图 14 采用螺旋同轴线馈电的双频段基站天线^[32]

Fig. 14 Dual-band base station antenna with helical coaxial feeding^[32]

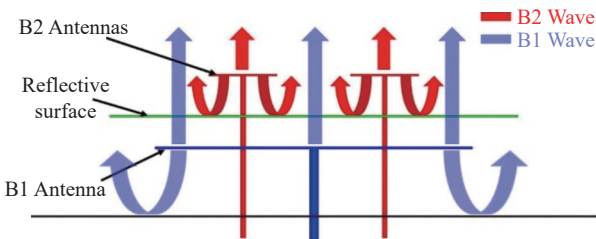


图 15 FSS 工作原理^[33]

Fig. 15 FSS working principle^[33]

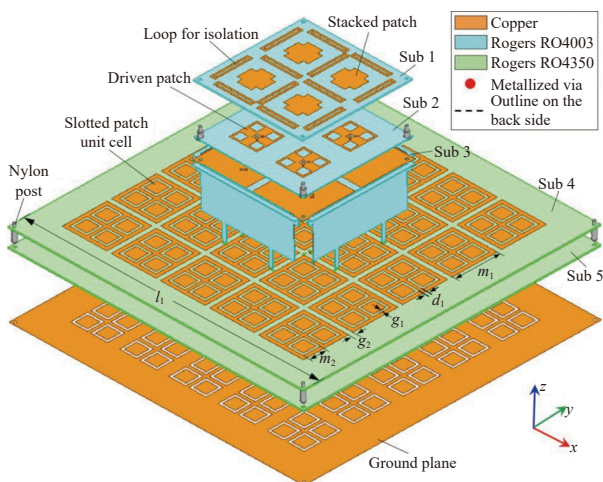


图 16 基于超表面的堆叠式双频段基站天线^[34]

Fig. 16 Metasurface-based stacked dual-band base station antenna^[34]

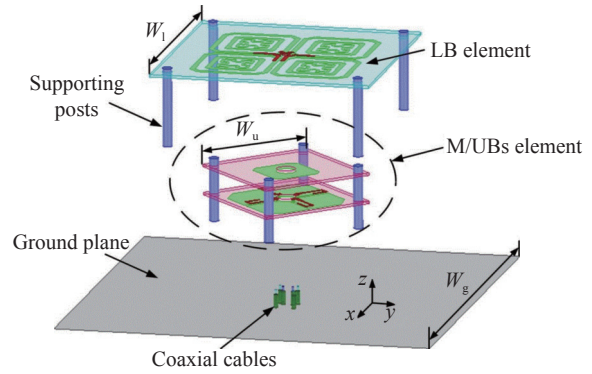


图 17 堆叠式三频段基站天线^[35]

Fig. 17 Stacked tri-band base station antennas^[35]

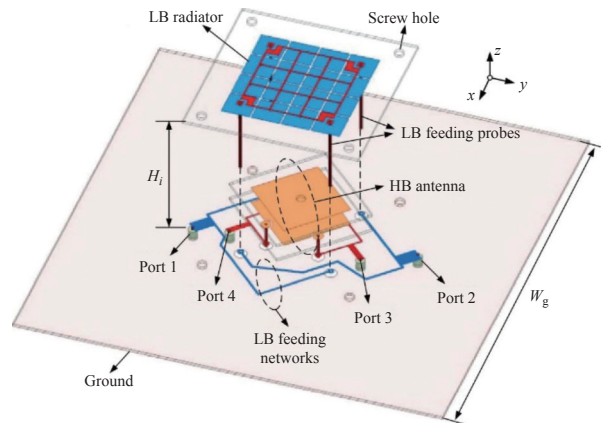


图 18 基于 FSS 的堆叠式双频段基站天线^[36]

Fig. 18 Stacked dual-band base station antenna with FSS^[36]

2.4 嵌套式多频段基站天线

嵌套式多频段基站天线充分利用低频阵元的空间资源, 将高频阵元嵌套在低频阵元的内部, 最大程度上减小了天线的整体尺寸. 在嵌套式多频段基站天线, 低频阵元不会对高频阵元造成直接遮挡, 因此散射干扰较小. 但是, 嵌套式排布非常紧凑, 高低频阵元之间容易耦合产生共模电流. 共模干扰将影响天线的阻抗匹配, 端口隔离和辐射性能等.

深圳大学何业军教授团队在 2015 年首次提出嵌套式双频段基站天线设计方案^[37]. 如图 19 所示, 天线阵列由 5 个高频阵元和 2 个低频阵元组成. 其中, 2 个高频阵元嵌套在碗状的低频阵元中心, 低频阵元的间距是高频阵元的 2 倍. 为了抑制高低频阵元间的耦合, 在单独的高频阵元四周添加了 4 块隔离金属挡板, 在高低频嵌套单元的边界放置了 2 块矩形金属挡板. 最终, 该嵌套式双频段基站天线在 820~960 MHz 和 1 710~2 170 MHz 频带内实现了小于 1.3 的电压驻波比和大于 30 dB 的端口隔离度. 2016 年, Huang 等人基于类似的高低频阵元嵌套和组阵方案, 将天线的带宽做了进一步拓展^[38], 拓展后的高低频带宽分别达到了 50.9%(1.64~2.76 GHz) 和 23.5%(0.79~1 GHz).

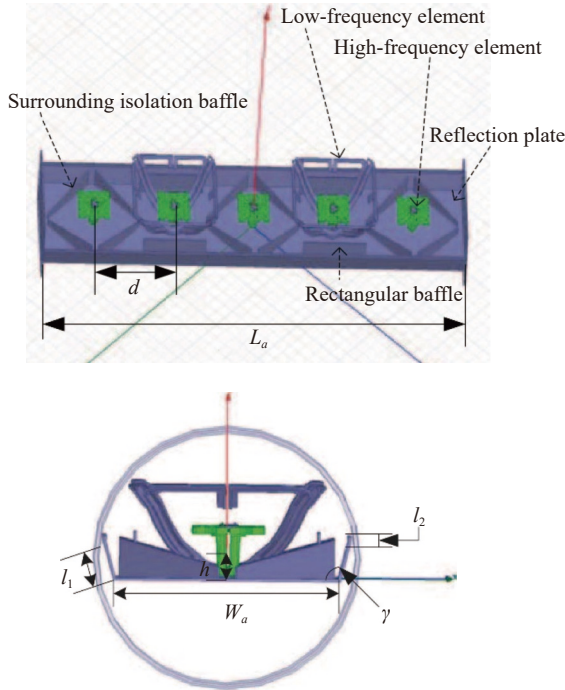


图 19 嵌套式双频段基站天线^[37]

Fig. 19 Embedded dual-band base station antenna^[37]

2018 年, Liu 等人提出了一种加载滤波枝节的嵌套式双频段基站天线^[39]. 如图 20 所示, 低频阵元由两对弯折的偶极子组成, 分别实现水平极化和垂直极化. 两对低频偶极子对称围成一个矩形框, 高频阵元嵌套在其中. 然而, 紧凑的嵌套结构引发了高低频阵元之间的严重耦合, 二者的馈电网络在另一个频段阵元工作时产生共模干扰, 导致端口隔离度恶化至 10 dB. 为了抑制共模干扰, 分别在高低频阵元的馈电网络中引入 L 形和 C 形的滤波枝节. 如图 21 所示, 加载滤波枝节后, 馈电网络上的共模电流被抑制, 高低频阵元间的端口隔离度达到了 25 dB.

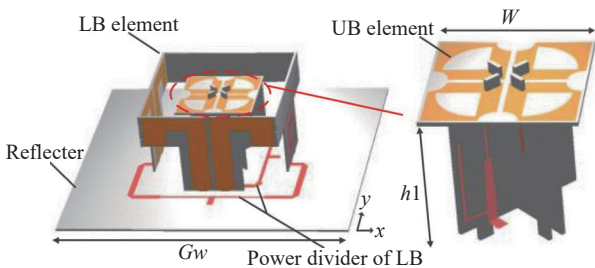


图 20 加载滤波枝节的嵌套式双频段基站天线^[39]

Fig. 20 Embedded dual-band base station antenna with filtering stubs^[39]

在天线直线阵列中, 阵元之间的距离大于半个波长并小于一个波长时, 天线阵列的增益和方向图性能最佳. 常规的嵌套式双频段基站天线阵列中, 低频阵元的间距是高频阵元的 2 倍. 但是当工作带宽比较宽时, 高低频阵元的间距难以同时维持在最佳波长范围之内, 导致方向图出现栅瓣、增益降低等.

针对这个问题, 华南理工大学薛泉教授团队提出了一种 2.5 倍间距的嵌套式双频段基站天线阵列^[40], 工作频段分别为 690~960 MHz 和 1 690~2 690 MHz. 如图 22 所示, 设计了两种尺寸大小的低频阵元, 在小的低频阵元中只嵌套 1 个高频阵元, 而大的低频阵元里嵌套 2 个. 因此, 低频阵元的间距是高频阵元的 2.5 倍, 二者均维持在半个波长和一个波长之间.

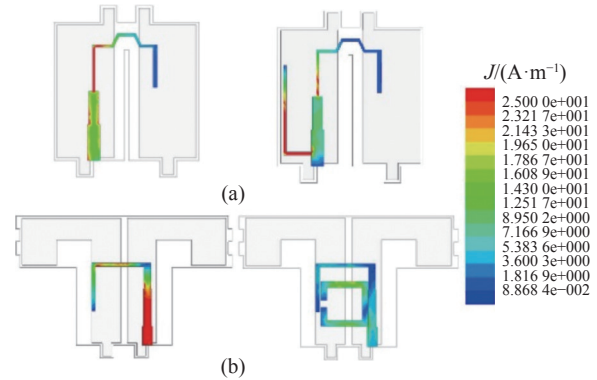


图 21 L 形 (a) 和 C 形 (b) 滤波枝节对共模电流的抑制^[39]

Fig. 21 Common-mode current suppression by L-shaped (a) and C-shaped (b) filtering stubs^[39]

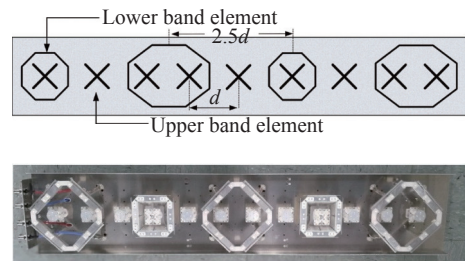


图 22 采用 2.5 倍间距的嵌套式双频段基站天线^[40]

Fig. 22 Embedded dual-band base station antenna with 2.5-time element spacing^[40]

2021 年, 华南理工大学褚庆昕教授团队提出了一种基于背腔结构的嵌套式双频段基站天线^[41]. 如图 23 所示, 低频阵元由一对环形偶极子组成, 4 个高频阵元搭载金属背腔嵌套在环形偶极子的开口处. 一方面, 引入的金属背腔是高频阵元独立的反射器, 有效地保持了高频阵元的辐射模式; 另一方面, 金属背腔可以看作是低频段的电小结构, 低频阵元的辐射模式主要还是取决于底部的反射板. 因此, 实现了高低频阵元相互独立/互不干扰的辐射环境. 此外, 在低频阵元的馈电巴伦上蚀刻了一些开口槽缝. 这些槽缝具有双重功能, 一是改善低频阵元的阻抗匹配, 二是抑制高频段的共模干扰.

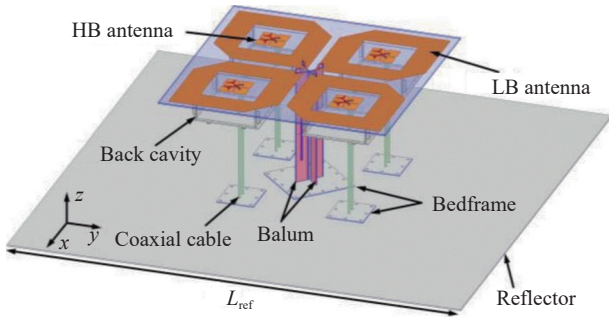


图 23 基于背腔结构的嵌套式双频段基站天线^[41]
 Fig. 23 Embedded dual-band base station antenna with cavity-backed structure^[41]

2.5 产业界研究现状

目前,并排式、交错式、堆叠式和嵌套式多频段基站天线已经广泛应用在产业界中.商用基站天线产品根据实际需求和成本,灵活采用一种或多种方式将不同频段的的天线组成阵列,实现基站天线的小型化.

2018年,京信通信技术(广州)有限公司提出了一种频率可调节的多频段基站天线^[42].如图24所示,中间一列的部分高频阵元嵌套在低频阵元中.低频阵元通过偶极子臂的复用和辐射臂的弯折,变成了类似碗的形状,从而减小了低频阵元的尺寸.并排在两侧的辐射阵元上加载了频率调节单元,改变其尺寸和介电常数可以调节辐射阵元的工作频带范围.

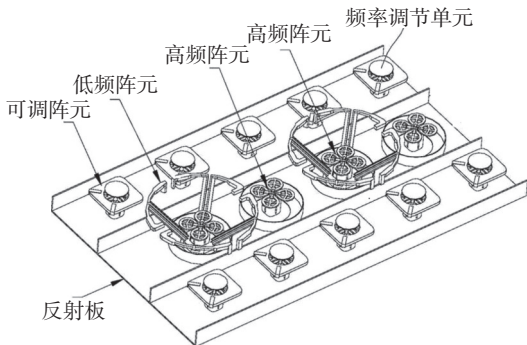


图 24 频率可调节的多频段基站天线^[42]
 Fig. 24 Frequency-adjustable multi-band base station antenna^[42]

2020年,美国康普公司提出了一种小型化双频段基站天线^[43].如图25所示,高低频阵元交错排布.该天线反射板的两面分别安装了馈电板和校准板,在有限的空间内集成了密集阵列的传输线路,实现了小型化的需求.

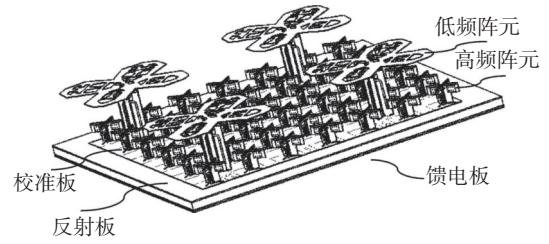


图 25 小型化双频段基站天线^[43]
 Fig. 25 Miniaturized dual-band base station antenna^[43]

2021年,摩比天线技术(深圳)有限公司提出了一种可分离的双频段基站天线^[44].如图26所示,该天线采用堆叠式结构,在高低频阵元之间引入FSS. FSS对下方的高频信号开路,对上方的低频信号则充当地的作用,从而抑制了高低频阵元间的耦合影响.此外,该FSS是可拆卸的结构,高低频阵元分离后可各自独立地工作.

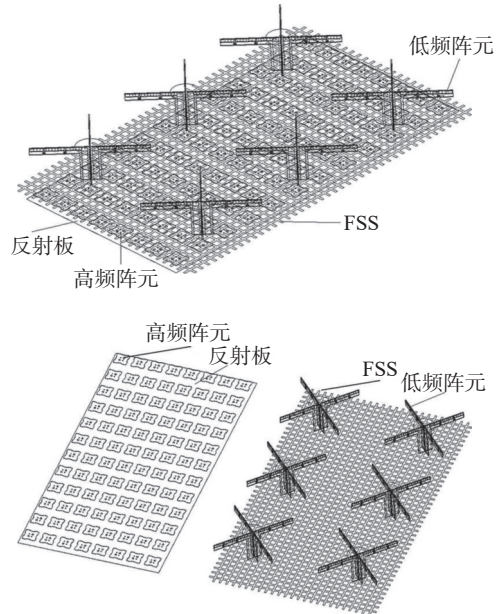


图 26 可分离的双频段基站天线^[44]
 Fig. 26 Detachable dual-band base station antenna^[44]

3 未来全频谱基站天线的关键技术

移动通信系统从2G演变至5G,基站天线也朝着多频段、小型化和集成化发展.常规的并排式多频段基站天线高低频阵元之间的距离较大,导致天线整体尺寸过大.为了满足基站天线小型化的要求,将高低频天线阵元共享口径组合是必然趋势.然而,多频段共口径基站天线内部异频阵元的布局非常紧密,容易引发异频耦合干扰,其将影响天线阻抗匹配、端口隔离和方向图等.因此,共口径技术和异频解耦技术是研究未来全频谱基站天线的两个关键技术.

3.1 共口径技术

共口径技术将不同频段的的天线阵元紧密排布在一起,共享部分或者全部辐射口径,从而提升天线的小型化水平.目前,多频段共口径基站天线按照高低频阵元的排布方式,主要分为交错式、堆叠式和嵌套式三种.然而在现有的文献中,都只研究了采用单独一种共口径方式的情形.对于能够支持未来全频谱接入通信的基站天线,根据不同共口径方式的优缺点,采用多种共口径方式混合搭配的方式可以进一步优化空间布局,提高口径利用效率,减小天线整体尺寸.此外,当前的共口径方式受到材料和工艺的限制,难以再有所创新.未来可以结合新材料和新工艺探索新型的共口径技术^[45].

3.2 异频解耦技术

异频耦合是指不同频段天线阵元之间的相互耦合.多频段共口径基站天线中的异频耦合干扰主要包括散射干扰和共模干扰^[46-48].散射干扰是指高频阵元工作时,在低频阵元的辐射器上耦合产生了感应电流,感应电流的辐射干扰导致高频阵元的辐射模式失真.共模干扰是指激励一个频段的的天线阵元时,在其他频段阵元的馈电结构上引发了共模谐振,导致端口隔离恶化、方向图畸变等问题.

针对散射干扰,主要有两种抑制途径:一是引入人工电磁表面,例如加载 FSS 或者超表面等,对不同频段的阵元分别呈现通带或者阻带特性,从而阻断异频阵元之间的感应耦合;二是改造低频阵元的辐射器,如截断辐射器、加载滤波枝节以及直接将辐射器设计成 FSS 等,使得高频阵元的辐射能够轻易穿透低频阵元而不受影响.

共模干扰的抑制,主要是通过改造馈电结构(同轴线或者巴伦)来实现的.针对同轴线馈电结构,可以将同轴线弯曲为螺旋状,或者在同轴线上加载铁氧体磁环^[49],从而消除同轴馈线上的共模电流.对于巴伦馈电结构,可以通过加载枝节,蚀刻槽缝以及引入接地线等方法,将产生共模谐振的频段移至天线的工作频段之外.

当前的异频解耦技术都只针对单一且带宽较窄的频段,多频段宽带化是未来异频解耦技术的发展方向.支持未来全频谱接入通信的基站天线将由大规模多频段共口径天线阵列组成,因此还需要研究大规模共口径阵列的电磁耦合原理,探索新型的异频解耦技术.

4 结论

移动通信系统的快速更新迭代,越来越多的频段投入使用,支持全频谱接入通信是未来基站天线

的发展趋势.面对紧缺的站址资源和高昂的运营成本,当前的多频段基站天线采用了共口径技术.共口径技术将不同频段的的天线阵元紧密组合在一起,共享部分或者全部辐射口径,大幅提升了空间利用率.然而不同频段的的天线紧凑排布,势必产生严重的异频耦合,引起散射干扰和共模干扰.因此,异频解耦技术是多频段共口径基站天线的核心技术.当前的共口径技术和异频解耦技术研究大都集中在双频段小天线阵列,采用的共口径方式单一,异频解耦带宽较窄.然而支持未来全频谱接入通信的基站天线具有频段数量多、阵列规模大的特点.因此,多种共口径方式结合技术、宽带异频解耦技术以及大规模共口径阵列解耦技术是未来全频谱接入通信基站天线的研究方向.

参考文献

- [1] 吴少彤.面向5G应用的共口径天线设计[D].西安:西安电子科技大学,2020.
WU S T. Design of co-aperture antenna for 5G application [D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [2] LI Z L, HAN J Q, MU Y J, et al. Dual-band dual-polarized base station antenna with a notch band for 2/3/4/5G communication systems[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2020, 19(2): 2462-2466.
- [3] ZHU J F, YANG Y, LIAO S W, et al. Aperture-shared millimeter-wave/sub-6 GHz dual-band antenna hybridizing Fabry-Pérot Cavity and Fresnel Zone Plate[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2021, 69(12): 8170-8181.
- [4] ZHANG J F, CHENG Y J, DING Y R. An S- and V-band dual-polarized antenna based on dual-degenerate-mode feeder for large frequency ratio shared-aperture wireless applications[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2020, 68(12): 8127-8132.
- [5] ZHANG J F, CHENG Y J, DING Y R, et al. A dual-band shared-aperture antenna with large frequency ratio, high aperture reuse efficiency, and high channel isolation[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2019, 67(2): 853-860.
- [6] 高凯.基于特征模理论的共口径天线设计研究[D].成都:电子科技大学,2021.
GAO K. Research and design of shared aperture antennas based on the characteristic mode analysis [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021. (in Chinese)
- [7] 张珂迪.小型化多频天线技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2018.
ZHANG K D. Research on miniaturized and multi-band an-

- tenna technologies [D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese)
- [8] CHENG Y, DONG Y D. Dual-broadband dual-polarized shared-aperture magnetoelectric dipole antenna for 5G applications[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2021, 69(11): 7918-7923.
- [9] LIU Z G, YIN R J, LU W B, TSENG K C. Dual-band and shared-aperture Fabry-Perot Cavity antenna[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2021, 20(9): 1686-1690.
- [10] 张静. 具有大频比的双频共口径贴片天线的研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2020.
ZHANG J. Research on dual-band shared-aperture patch antennas with large frequency ratio [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2020. (in Chinese)
- [11] 林伟强. 多频共口径阵列天线技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
LIN W Q. Research on multi-frequency shared-aperture array antennas technology [D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese)
- [12] SHEN F, YIN C Y, GUO K, et al. Low-cost dual-band multipolarization aperture-shared antenna with single-layer substrate[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2019, 18(7): 1337-1341.
- [13] XU G H, YANG L X, HUANG Z X, et al. Microstrip grid and patch-based dual-band shared-aperture differentially fed array antenna[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2021, 20(6): 1043-1047.
- [14] 王敬. 双波段双极化共口径微带天线阵研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
WANG J. Research on dual-band dual-polarized shared-aperture microstrip antenna array [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017. (in Chinese)
- [15] ZHOU C F, YUAN S S, LI H, et al. Dual-band shared-aperture antenna with bifunctional metasurface[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2021, 20(10): 2013-2017.
- [16] 杨鑫. 宽带多频共口径天线技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
YANG X. The research of wideband multi-band aperture-shared antenna [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021. (in Chinese)
- [17] HUANG H, LI X P, LIU Y M. A method to suppress the coupling of dual-frequency antennas[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2021, 20(8): 1458-1462.
- [18] 蒋旻熠. 共享站址的基站天线耦合问题研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
JIANG X Y. Analysis of the mutual coupling effects between the base station antennas with sharing site [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019. (in Chinese)
- [19] LI M T, CHEN X M, ZHANG A X, et al. Split-ring resonator-loaded baffles for decoupling of dual-polarized base station array[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2020, 19(10): 1828-1832.
- [20] WEI C N, ZHANG Z Y, WU K L. Phase compensation for decoupling of large-scale staggered dual-polarized dipole array antennas[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2020, 68(4): 2822-2831.
- [21] LI M, WANG M, JIANG L J, et al. Decoupling of antennas with adjacent frequency bands using cascaded decoupling network[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2021, 69(2): 1173-1178.
- [22] LIU F, GUO J Y, ZHAO L Y, et al. Ceramic superstrate-based decoupling method for two closely packed antennas with cross-polarization suppression[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2021, 69(3): 1751-1756.
- [23] 赵鲁豫, 赵阁, 刘锋, 等. 多天线系统的电磁耦合及干扰特性研究[J]. *安全与电磁兼容*, 2021(3): 12-19.
ZHAO L Y, ZHAO G, LIU F, et al. Research on electromagnetic coupling and interference characteristics of multiple antenna system[J]. *Safety and EMC*, 2021(3): 12-19. (in Chinese)
- [24] ZHANG Y, ZHANG X Y, YE L H, et al. Dual-band base station array using filtering antenna elements for mutual coupling suppression[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2016, 64(8): 3423-3430.
- [25] LI M, LI Q L, WANG B, et al. A miniaturized dual-band base station array antenna using band notch dipole antenna elements and AMC reflectors[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2018, 66(6): 3189-3194.
- [26] HE Y J, YUE Y D, ZHANG L, et al. A dual-broadband dual-polarized directional antenna for all-spectrum access base station applications[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2021, 69(4): 1874-1884.
- [27] SUN H H, DING C, ZHU H, et al. Suppression of cross-band scattering in multiband antenna arrays[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2019, 67(4): 2379-2389.
- [28] HE D L, YU Q, CHEN Y K, et al. Dual-band shared-aperture base station antenna array with electromagnetic transparent antenna elements[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2021, 69(9): 5596-5606.
- [29] HE Y J, HUANG W, HE Z, et al. A novel cross-band decoupled shared-aperture base station antenna array unit for 5G mobile communications[J]. *IEEE open journal of antennas and propagation*, 2022, 3: 583-593.
- [30] CHANG Y L, CHU Q X. Suppression of cross-band coup-

- ling interference in tri-band shared-aperture base station antenna[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2022, 70(6): 4200-4214.
- [31] CHEN Y K, ZHAO J C, YANG S W. A novel stacked antenna configuration and its applications in dual-band shared-aperture base station antenna array designs[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2019, 67(12): 7234-7241.
- [32] ZHU Y F, CHEN Y K, YANG S W. Helical torsion coaxial cable for dual-band shared-aperture antenna array decoupling[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2020, 68(8): 6128-6135.
- [33] ZHU Y F, CHEN Y K, YANG S W. Decoupling and low-profile design of dual-band dual-polarized base-station antennas using frequency selective surface[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2019, 67(8): 5272-5281.
- [34] CAO Y F, ZHANG X Y, XUE Q. compact shared-aperture dual-band dual-polarized array using filtering slot antenna and dual-function metasurface[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2022, 70(2): 1120-1131.
- [35] ZHOU G N, SUN B H, LIANG Q Y, et al. Triband dual-polarized shared-aperture antenna for 2G/3G/4G/5G base station applications[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2021, 69(1): 97-108.
- [36] YANG S J, ZHANG X Y. Frequency selective surface-based dual-band dual-polarized high-gain antenna[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2022, 70(3): 1663-1671.
- [37] HE Y J, PAN Z Z, CHENG X D, et al. A novel dual-band, dual-polarized, miniaturized and low-profile base station antenna[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2015, 63(12): 5399-5408.
- [38] HUANG H, LIU Y, GONG S X. A novel dual-broadband and dual-polarized antenna for 2G/3G/LTE base stations[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2016, 64(9): 4113-4118.
- [39] LIU Y, WANG S H, LI N, et al. A compact dual-band dual-polarized antenna with filtering structures for sub-6 GHz base station applications[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2018, 17(10): 1764-1768.
- [40] JIA F F, LIAO S W, XUE Q. A dual-band dual-polarized antenna array arrangement and its application for base station antennas[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2020, 19(6): 972-976.
- [41] LI Y X, CHU Q X. Coplanar dual-band base station antenna array using concept of cavity-backed antennas[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2021, 69(11): 7343-7354.
- [42] 王强, 孙正辉, 李萌, 等. 多频基站天线及其辐射单元: 中国, CN108717990B [P]. 2020-09-01.
- [43] 王小拓, 邵曙光. 天线组件和基站天线: 美国, CN113497341A [P]. 2021-10-12.
- [44] 曾志, 邱小凯, 吴祖德, 等. 低频辐射单元及可分离的多频基站天线: 中国, CN112599974B[P]. 2021-09-07.
- [45] 陈亚玲, 何业军. 3D金属打印天线技术研究综述[J]. *电波科学学报*, 2018, 33(3): 266-278.
- CHEN Y L, HE Y J. Review of 3D metal printed antenna technologies[J]. *Chinese journal of radio science*, 2018, 33(3): 266-278. (in Chinese)
- [46] 丁潮锋. 无线通信天线间的同频与异频去耦技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- DING C F. Investigation of in-band and out-of-band decoupling techniques for antennas in wireless communication system [D]. Guangzhou: South China University of Technology Guangzhou, 2019. (in Chinese)
- [47] 薛成戴. 天线间的同频与异频去耦技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- XUE C D. Investigation of antenna in-band and out-of-band decoupling techniques [D]. Guangzhou: South China University of Technology Guangzhou, 2018. (in Chinese)
- [48] 褚庆昕, 李祎昕, 常玉林. 基站天线异频去耦技术新进展[J]. *安全与电磁兼容*, 2021(5): 23-28+41.
- CHU Q X, LI W X, CHANG Y L. New progresses of cross-band decoupling techniques for base station antennas[J]. *Safety and EMC*, 2021(5): 23-28+41. (in Chinese)
- [49] CHANG Y L, CHU Q X. Ferrite-loaded dual-polarized antenna for decoupling of multiband multiarray antennas[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2021, 69(11): 7419-7426.

作者简介



何业军 (1969—), 男, 湖北人, 深圳大学电子与信息工程学院教授, 博士生导师, IET Fellow, IEEE 天线与传播学会深圳分会主席, 深圳大学荔园优秀学者, 广东省基站天线与电波工程技术研究中心主任, 深圳市天线与电波重点实验室主任, 研究方向为无线通信、天线与射频等. E-mail: heyejun@126.com



黄伟 (1996—), 男, 江西人, 深圳大学电子与信息工程学院硕士研究生, 研究方向为天线与射频. E-mail: harveymail@yeah.net

(下转第 43 页)



郑一 (1993—), 女, 山东人, 东南大学信息科学与工程学院在读硕士研究生, 研究方向为超大规模 MIMO 信道测量、特性分析和建模, 以及面向海洋通信的超大规模 MIMO 信道特性分析和建模. E-mail: zheng_yi@seu.edu.cn



黄杰 (1991—), 男, 湖北人, 博士, 东南大学信息科学与工程学院、移动通信国家重点实验室副研究员, 紫金山实验室双聘科研人员, 主要研究方向为毫米波、太赫兹、超大规模天线信道测量与建模, 智能反射面信道测量与建模, B5G/6G 关键技术. E-mail: j_huang@seu.edu.cn

(上接第 26 页)



陈亚玲 (1995—), 女, 广东人, 深圳大学电子与信息工程学院本硕博连读研究生, 研究方向为天线与射频. E-mail: 2033649312@qq.com



李文廷 (1987—), 男, 河南人, 深圳大学电子与信息工程学院助理教授, 研究方向为反射阵列、紧耦合阵列、多波束天线、毫米波天线、可重构天线等. E-mail: 525645594@qq.com



张龙 (1986—), 男, 湖北人, 深圳大学电子与信息工程学院助理教授, 研究方向为毫米波天线与阵列、漏波及表面波天线、紧耦合阵列、反射阵与透射阵、手机及基站天线等. E-mail: longzhang717@163.com