

· 专题:5G移动通信基础理论与关键技术 ·

面向5G移动通信的滤波天线及阵列

曹云飞 杨圣杰 章秀银*

华南理工大学 电子与信息学院,广州 510641

[摘要] 本文介绍了本课题组在微波毫米波滤波天线技术方面的研究进展及其在5G天线阵列中的应用情况。介绍了不需额外滤波电路、在辐射体上集成滤波功能的天线设计方法,并且利用滤波单元的带外抑制功能进行Sub-6GHz双频共口径天线阵列的异频去耦,实现了5G与2G/3G/4G天线的高度集成,有助于解决5G网络建设中天线安装空间严重不足的问题。介绍了毫米波滤波天线与阵列的设计方法,在近似不影响带内性能的情况下实现了带外抑制,有助于克服毫米波滤波器损耗大或难集成的问题。

[关键词] 滤波天线;双频天线;共口径天线;大规模天线;毫米波天线

天线是移动通信系统中的重要组件,直接决定了无线信号的覆盖质量。从1G(第一代移动通信)到5G,天线经历了从窄带到宽频带、多频带,从单天线到MIMO(多人多出技术, Multiple-Input Multiple-Output)再到大规模MIMO,单元数量越来越多,兼容的频段越来越多,阵列规模越来越大。1G属于模拟系统,天线几乎都是全向,当时的用户数量很少,传输的速率也较低。到了2G进入了蜂窝时代,天线逐渐演变成了定向天线,典型的10dB波瓣宽度为 120° ,工作带宽相对较窄,三个扇区实现全向覆盖。3G时代,工作频带进一步拓展,多频段天线技术开始使用,使得系统性能大幅提升。4GLTE(Long Term Evolution)时代,MIMO技术实现商用,大幅提升了系统容量,4G基站的阵列规模多为2T2R(2发射2接收),最大不超过8T8R。5G时代基站形态进一步升级,无论是在6GHz以下频段(sub-6GHz)还是在毫米波频段,均需要采用Massive(大规模)MIMO技术^[1],主流的阵列规模达到64T64R。

目前的5G天线以单频为主,仅仅支持5G系统。但是,新一代移动通信系统往往需要与前代移动通信系统并存使用,以满足不同用户多制式的使用需求。由于不同系统采用独立的天线,这就要求



章秀银 华南理工大学电信学院教授、博导、副院长。先后获得或入选国家杰出青年基金、万人计划科技创新领军人才、青年长江学者。曾荣获广东省自然科学一等奖(第一完成人)、中国通信学会一等奖。研究领域包括:滤波天线、大规模MIMO天线、多器件协同融合设计、数字射频、无线输能、微波单片集成电路。发表SCI论文140余篇,其中IEEE Trans.论文85篇。已授权中国发明专利43项和美国专利7项。



曹云飞 华南理工大学博士后,主要从事滤波天线、MIMO天线、可重构天线等方面的研究工作。先后主持国家自然科学基金青年项目、中国博士后科学基金特别资助&面上资助等6项科研项目,并实现了进一步的产业化应用。累计发表JCR一区IEEE Trans.论文11篇,SCI/EI论文33篇。曾获得广东省“珠江人才计划”博士后资助项目、2018年中国通信学会科学技术奖(科技进步类)一等奖。

5G天线阵列在基站上布署时,需要和2G、3G、4G天线阵列共存。而实际网络中用于安装基站天线的天面资源非常紧张,2G、3G、4G天线阵列已经占据最佳位置,5G天线阵列很难布署到最优位置。为了解决这一问题,业界期望采用sub-6GHz频段的5G大规模天线以兼容2G、3G、4G频段。异频共口径阵

收稿日期:2020-03-31;修回日期:2020-04-06

* 通信作者,Email:zhangxiuyin@scut.edu.cn

本文受国家自然科学基金项目(61725102、61701182)资助。

列天线可在一个辐射口面下集成多个频段的的天线从而实现多系统天线的高度集成,是解决该问题的有效方案。该阵列采用相互独立的不同频段阵子,可满足不同频段的波束扫描要求^[2-4]。此外,还具有不同频阵子组阵灵活性高、阵子馈电网络可以独立设计、稳定性好、集成度高等优势。如果采用异频共口径天线阵列同时兼容 3G、4G、5G 等多个频段,就可以在几乎不开销天面资源的情况下,完成多系统兼容的建设目标。而异频共口径天线阵列中不同频阵子面临严重的异频互扰问题,会导致天线隔离度恶化、方向图畸变及辐射效率下降等问题。利用滤波天线的带外抑制功能可以有效抑制天线在带外的谐振模式,减弱异频互耦导致的方向图畸变的问题,这一技术得到学术界和产业界的关注。

目前的滤波天线设计方法主要有三种。第一种是直接采用滤波器与天线级联,将天线辐射体作为滤波器电路的最后一级谐振器^[5-7]。第二种方法是将滤波电路集成到天线的馈电网络中^[8,9]。但是以上这两种方法会增大整个天线的体积,并引入额外的损耗。第三种方法是在天线带外构建非辐射谐振模式或是在辐射体上引入寄生结构,产生带外辐射零点^[10,11]。例如,Zhang 等在层叠贴片结构中引入短路探针,在带外产生干扰性谐振模式,产生辐射零点,实现滤波功能^[10]。Ding 等在电偶极子上方加载寄生方环结构,在带外方环上产生耦合电流,其方向与电偶极子上的电流相反,实现两者辐射的相互抵消,产生带外辐射零点,实现滤波功能^[11]。相比于前两种方法,第三种方法无需引入额外的滤波电路,避免引入额外损耗,同时没有增大天线体积和设计复杂度。本课题组针对这一方法开展了深入研究,提出了可满足阵列的要求的系列设计方法。

除了 Sub-6 GHz 频段需要滤波天线技术外,5G 毫米波频段也需要滤波天线技术。毫米波射频前端需要使用滤波器来抑制镜像频率干扰、中频泄漏、高次谐波以及来自其他系统的干扰。然而,在毫米波频段,如果采用紧凑的片上滤波器^[12],其品质因数(Q 值)较低导致插入损耗较高(超过 2.5 dB)。而高

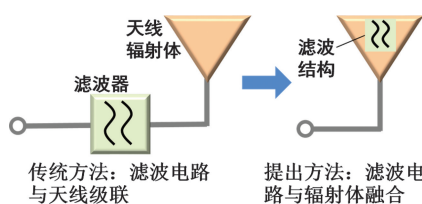


图 1 无额外滤波电路的滤波天线设计思路

Q 值滤波器体积较大^[13],难以与芯片一体化集成到 5G 毫米波系统中。此外,如果高 Q 值滤波器单独封装,它与芯片的互连也会引入额外损耗。因此,本文提出将滤波功能集成到毫米波天线中,可以降低毫米波系统对滤波器性能的要求。

针对上述问题与需求,本课题组开展了 Sub-6 GHz 频段的滤波天线单元研究,并基于滤波单元设计了双频共口径天线阵列。此外,还研究了 5G 毫米波滤波天线单元以及毫米波 MIMO 天线阵列。具体的研究进展如下:

1 Sub-6 GHz 频段滤波天线单元

双频共口径天线阵列要求滤波单元具有体积紧凑、损耗低、带外抑制高的特点。为了满足这一需求,本课题组提出了无额外滤波电路的滤波天线设计思路。如图 1 所示,在辐射体上集成滤波功能,激励带外辐射抑制模式,实现滤波特性,避免了传统的滤波电路与天线辐射体级联方法带来的损耗大、体积大等问题。基于这一思路,提出了一个双极化滤波贴片天线、两个双极化滤波电偶极子天线。

1.1 无额外滤波电路的双极化滤波贴片天线单元

图 2 为该双极化滤波贴片天线的示意图,主要由一个激励贴片、一个层叠寄生贴片、一个馈电网络组成^[14]。层叠贴片位于激励贴片上方,激励贴片下方为馈电网络。该馈电网络具有双重功能,一方面在工作频带内对天线辐射体馈电,另一方面该馈电网络可等效为一个滤波器,能在通带边缘产生辐射零点和良好的滚降性能。层叠的贴片不仅可用于拓展带宽,还可以用于在通带的上边缘引入传输零点

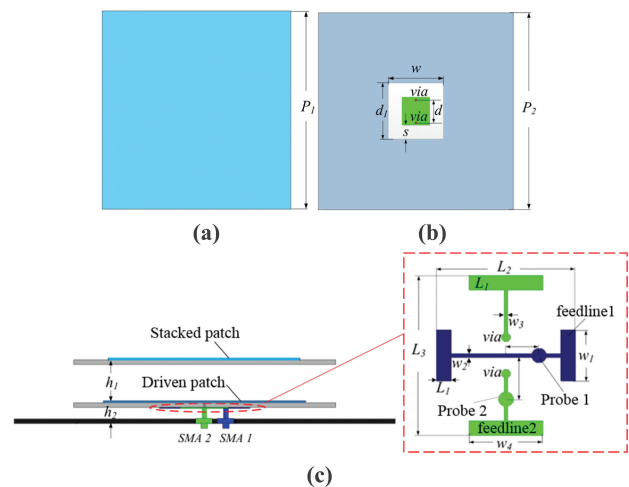


图 2 双极化滤波贴片天线结构图
(a) 层叠贴片; (b) 激励贴片; (c) 侧视图

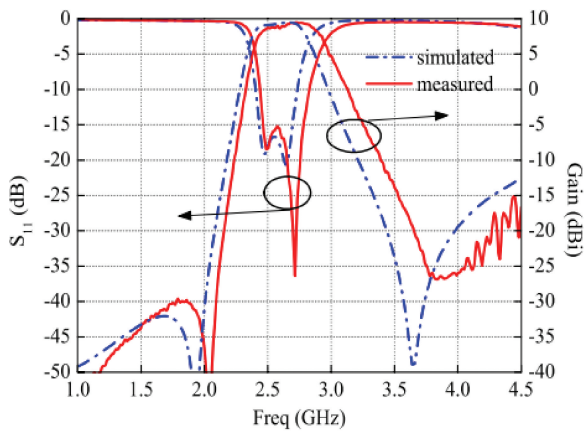


图3 双极化滤波贴片天线的反射系数和增益曲线

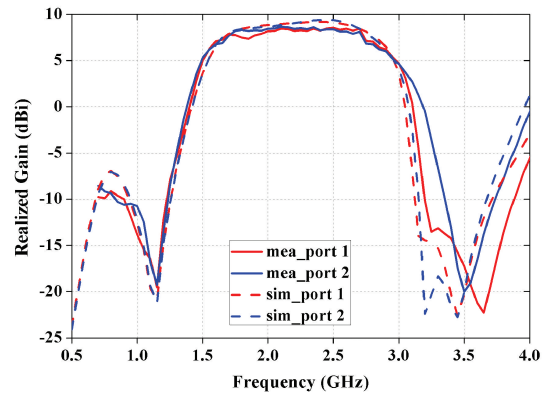


图5 图4中的双极化滤波电偶极子天线增益曲线

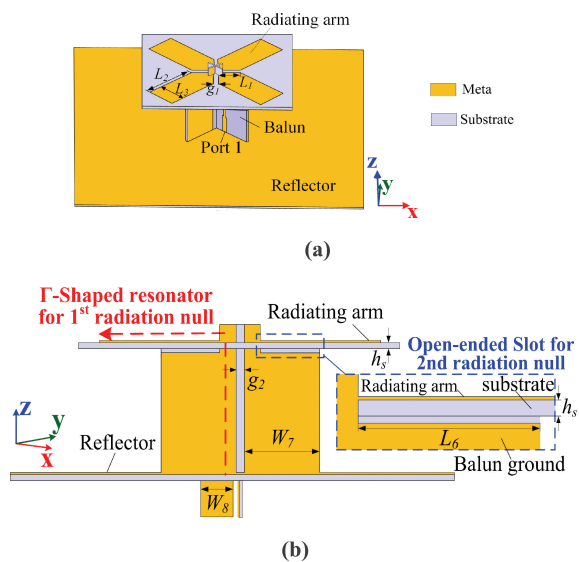


图4 基于内在谐振模式的双极化滤波电偶极子天线 (a) 整体图 (b) 侧视图

产生抑制。如图3所示,该天线具有2.46~2.78 GHz的阻抗带宽,极化隔离为35 dB。其平均带内增益为9 dBi,相比于主极化的交叉极化幅度为-29 dB。在1.71~2.17 GHz的阻带中,其增益抑制幅度超过30 dB,在3.3~4.3 GHz的阻带,其增益抑制接近25 dB。由此可见,该天线在工作频带内可实现高效辐射,在阻带内可大幅抑制辐射。

1.2 基于内在谐振模式的双极化滤波电偶极子天线

所提出的双极化滤波电偶极子天线的结构如图4所示^[15]。整个天线由相互垂直放置的两个交叉形电偶极子、两个巴伦和一个反射板组成。如图4(b)所示,巴伦的背面金属板与辐射臂连接,形成一个Γ型谐振器,该谐振器在通带的下边缘产生第一辐射零点。在辐射臂与巴伦的背面金属板之间形成

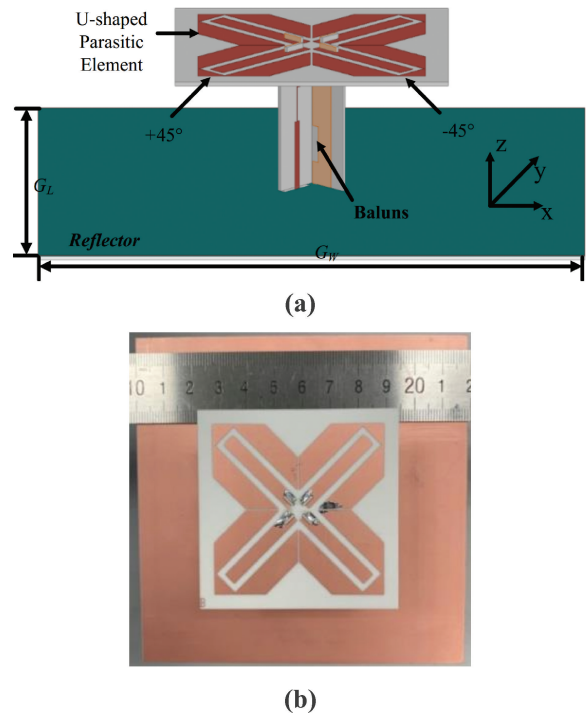


图6 具有带宽增强功能的双极化滤波电偶极子天线 (a) 结构图 (b) 实物图

了一个四分之一波长缝隙,在通带的上边缘附近产生第二个辐射零点。巴伦的半波长开路微带线在通带的上边缘附近产生第三辐射零点。

该天线的阻抗带宽为1.7~2.8 GHz(48.8%)。在整个工作频带上,极化隔离度大于35 dB。如图5所示,工作带宽内的增益平均值为8 dBi,且带内平坦。第一、第二和第三辐射零点分别位于1.15、3.2和3.5 GHz。这些辐射零点的增益抑制大于20 dB。由此可见,该天线并没有增加额外结构,但是实现了宽频带和带外抑制。

1.3 基于辐射抵消的双极化滤波电偶极子天线

所提出的结构简单的宽带滤波电偶极子天线如

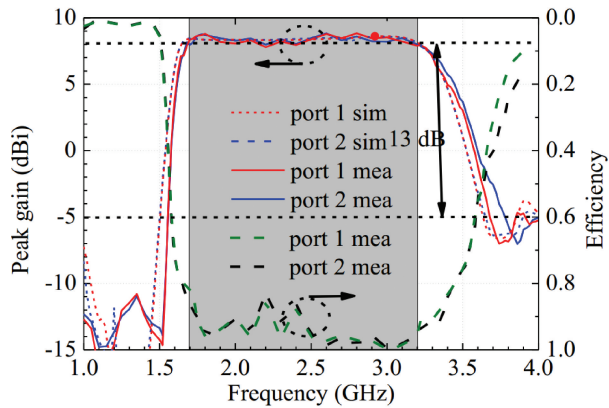


图 7 图 6 中双极化滤波电偶极子天线增益与效率曲线

图 6 所示^[16]，它由一个双极化主辐射体、两个馈电巴伦和一个地板组成。主辐射体由一对互相垂直的电偶极子组成，每个振子臂都被一个 U-型寄生单元围绕。U-型寄生单元用于增强带宽并在通带边缘附近引入两个辐射零点，以提升频率选择性。所提出的天线结构相当简单，辐射结构采用的是单层介质板，没有任何复杂的滤波结构。

该滤波天线的阻抗带宽是 63% (1.68~3.23 GHz)，通带内的极化隔离度超过 32 dB。如图 7 所示，通带内天线的最大增益在 8.5 dBi 左右，增益曲线在通带边缘具有很好的滚降特性。带外增益抑制水平超过 13 dB。

2 Sub-6 GHz 频段双频共口径天线阵列

传统的双频天线阵列中高低频子阵列多是相互独立、并排放置，阵列整体体积大。为了克服这一问题，如图 8 所示，采用滤波天线单元可实现双频共口径天线阵列，将两个频段的单元集成在一起，利用滤波单元的带外抑制功能实现异频去耦。相比于单频阵列，几乎不增加额外体积。基于这一基本方法，提出了两种采用滤波天线的双频天线阵列。

2.1 基于嵌套式滤波单元的双频双极化天线阵列

双频双极化天线阵列^[17]所采用的双频双极化滤波天线单元的结构如图 9 所示。它由一个低频段 (790~862 MHz) 滤波贴片天线和环绕该贴片天线的四个高频段 (880~960 MHz) 电偶极子组成。低频贴片天线与 1.1 中的天线结构类似，为了提高极化隔离度，低频贴片天线采用差分馈电的方法。低频天线在高频段具有很好的带外抑制特性。高频双极化偶极子天线由四个对称放置的正方形排布的滤波偶极子辐射器组成。每个滤波偶极子由半波长辐

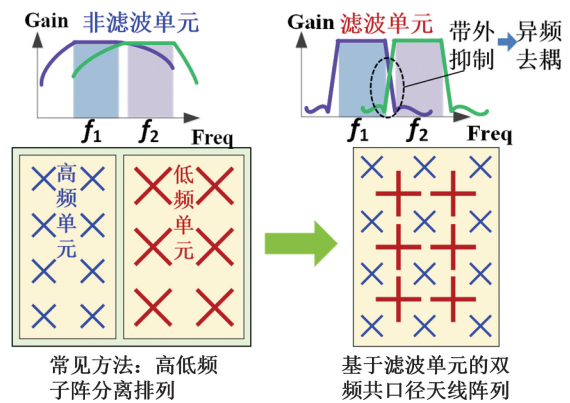


图 8 基于滤波单元的双频共口径天线阵列研究思路

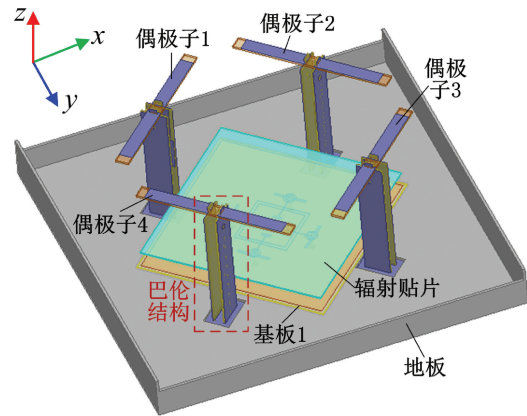


图 9 双频双极化滤波天线单元示意图

射臂和巴伦组成。该巴伦馈电网络可以在较低频边缘产生带阻响应。

如图 10 所示，基于上述的双频双极化滤波天线单元构建了 9 单元天线阵列。天线单元之间的距离设置为 280 mm，即 $0.737\lambda_L$ ，其中 λ_L 是 790 MHz 的自由空间波长。将低频天线单元嵌入到高频天线单元中，实现了更紧凑的尺寸。地板的宽度为 280 mm，仅为同类型产业界产品 (576 mm) 的一半。该阵列具有双波段 $\pm 45^\circ$ 双极化特性，工作频带为 790~862 和 880~960 MHz，频率间隔非常近。低频贴片天线和高频电偶极子分别在较高和较低频带边缘具有带阻响应。利用两者良好的带外辐射抑制特性，实现了高低频段的异频去耦，在两个工作频段内的异频隔离度达到 19 dB 以上。天线阵列在高低频段增益分别达到 18 和 17.4 dBi。

2.2 交织排列的双频双极化双波束天线

本小节中介绍一种双频双极化两波束天线阵列^[18]。低频和高频单元分别工作在 1710~2170 和 2490~2690 MHz。如图 11 所示，通过使用滤波天线单元，低频和高频子阵列交错排布。利用

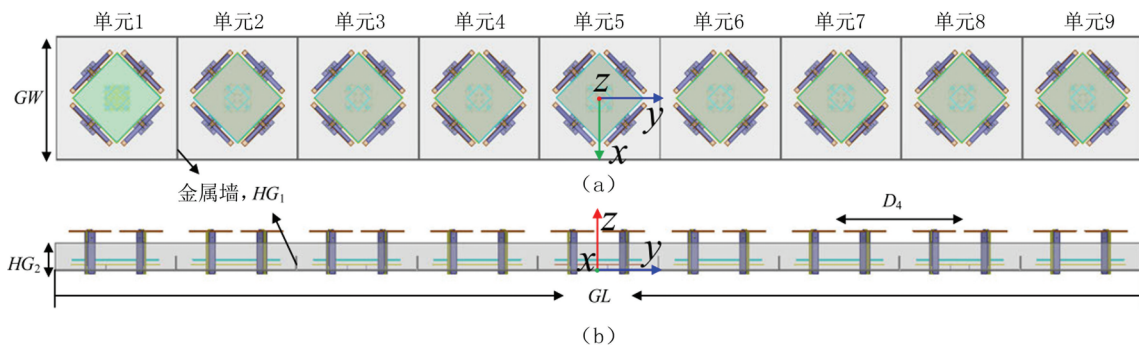


图 10 基于嵌套式滤波单元的小频率比的双频双极化天线阵列示意图

滤波天线的带外抑制功能实现异频去耦。整个阵列由两个 4×4 子阵列组成,其中低频单元的尺寸较大,而高频单元的尺寸较小。这种排布方式与常规方案相比,可以有效地减小阵列尺寸。在这种设计中,低频和高频单元之间的边到边间距仅为 $15 \text{ mm} (0.097\lambda_{0L}/0.130\lambda_{0H}, \lambda_{0L}$ 是低频对应的自由空间波长, λ_{0H} 是高频对应的自由空间波长)。因此,基于该结构,天线阵列整体尺寸很小。 4×8 双频双极化双波束阵列需要两个低频和高频波束形成网络(BFN)。

如图 12 所示,低频阵列在 2.0 GHz 的峰值增益为 15.3 至 16.4 dBi ,高频阵列在 2.6 GHz 的峰值增益为 14.0 至 15.5 dBi 。两个频段之间具有良好的隔离。如图 13 所示,天线阵列具有两个稳定的波束。 10-dB 波束宽度范围为 107 至 136° ,在每个波束中心的方向上,主极化水平比

交叉极化水平至少高 14 dB 。

3 5G 毫米波滤波天线及阵列

在 5G 毫米波前端中,如果采用片上滤波器,其 Q 值较低、损耗大,而高 Q 值毫米波滤波器体积大、难以与芯片集成,互连损耗大。为了克服这些问题,本课题组研究了两种 5G 毫米波滤波天线,并基于滤波天线提出了一种 4×4 毫米波 MIMO 天线阵列,还研究了一种 5G 毫米波大规模天线阵列。

3.1 基于辐射体与滤波结构融合的毫米波宽带双极化滤波天线

本课题组基于辐射体与滤波结构的融合设计^[19],将带外抑制功能集成到贴片天线中去,在无需任何额外滤波电路的情况下,提出了 $24.25 \sim 29.5 \text{ GHz}$ 频段的毫米波双极化滤波天线。

如图 14 所示,所提出的毫米波双极化滤波天线主要由一个差分馈电的十字形激励贴片、四个层叠的寄生贴片和地板组成。四个短路贴片加载在十字形激励贴片的四周,用来产生低频带辐射零点。一个十字形微带线插入到四个寄生的叠层贴片中间,用来产生高频带辐射零点。

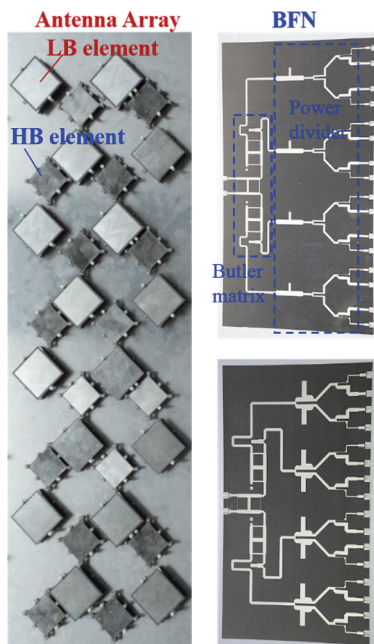


图 11 交织排列的双频双极化双波束天线阵列

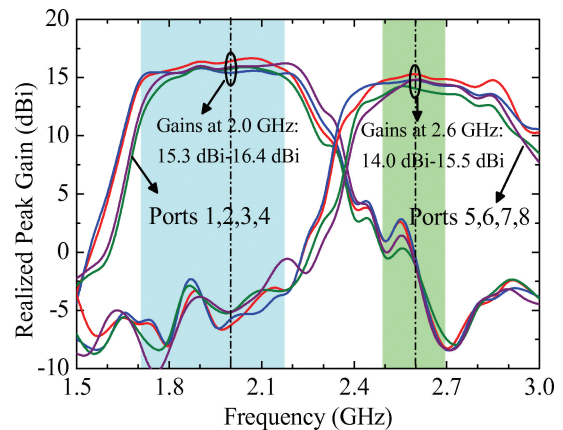


图 12 图 11 中的天线阵列增益测试结果

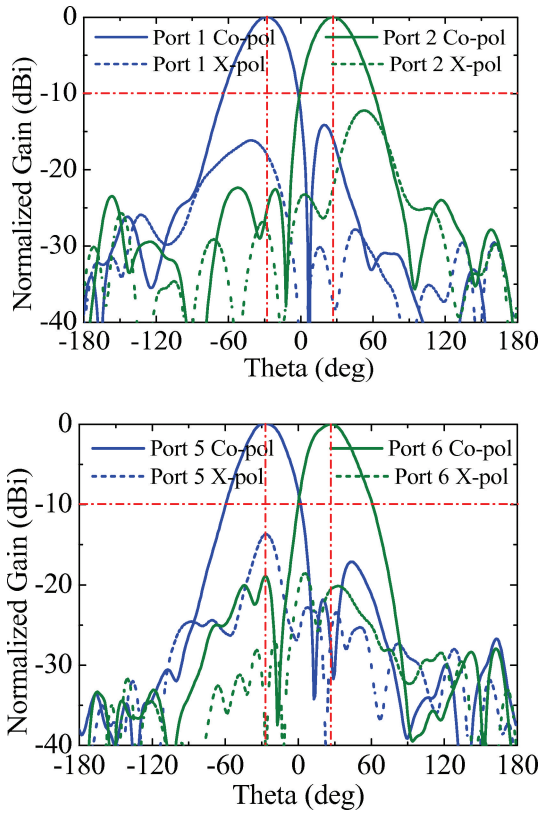


图 13 测得的归一化方向图 (a) 2.0 GHz (b) 2.6 GHz

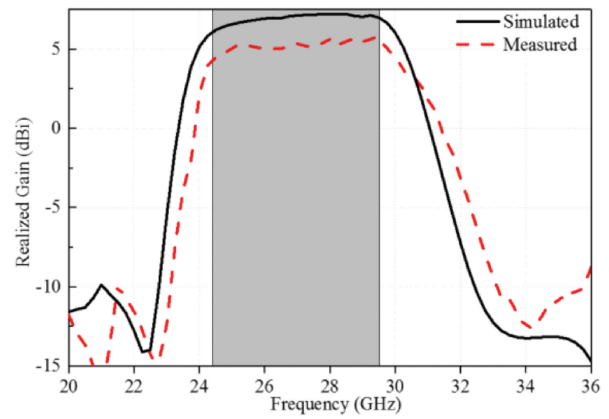


图 15 图 14 中毫米波双极化滤波天线的测试增益曲线

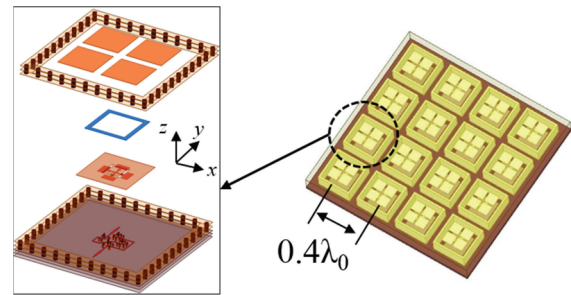


图 16 基于滤波单元的 5G 毫米波 MIMO 天线阵列结构图

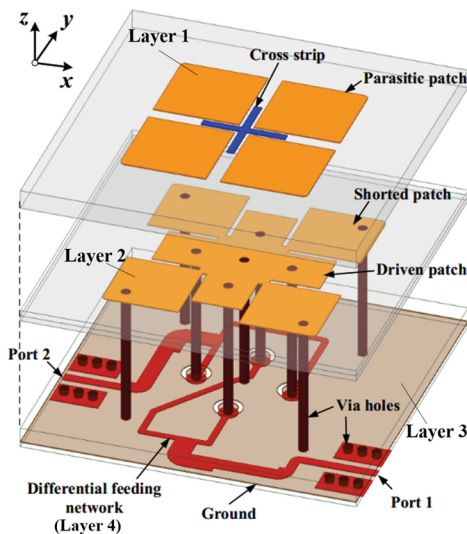


图 14 基于辐射体与滤波结构融合的毫米波宽带双极化滤波天线

该毫米波双极化滤波天线的仿真和测试的增益曲线如图 15 所示。其阻抗带宽 ($|S_{11}| < -10$ dB) 为 20% (24.25~29.5 GHz)。整个通带内的极化隔离度在 35 dB 以上。天线的带内增益理论值在 6.6 dBi, 增益曲线在 23 GHz 和 33 GHz 迅速滚降至 -10 dBi 以下, 阻带内的辐射抑制制度达到 16 dB。该天线的交叉极化幅度 (相比于主极化) 为 -30 dB, 波

束宽度在 75~82° 之间。由此可见, 该天线在保持工作频带内辐射性能的同时实现了带外抑制。

3.2 毫米波双极化高通滤波天线及大规模 MIMO 阵列

本课题组将采用辐射体上加载谐振器的方式, 实现了 24.25~29.5 GHz 的毫米波双极化高选择性高通滤波天线。

如图 16 所示, 天线单元采用两个正方形的层叠式贴片结构作为辐射体, 通过差分馈电的 H 型微带线耦合贴片实现较好的高通滤波特性, 与图 2 中的结构类似。在贴片下层位置加载方形环谐振器结构可在通带低频边沿位置额外引入辐射抑制零点以提高边带滚降。基于上述双极化滤波贴片天线单元设计了 4×4 毫米波 MIMO 天线阵列。该阵列工作在 24.25~29.5 GHz。天线单元间距为 $0.4\lambda_0$ (λ_0 为中心频率的自由空间波长)。如图 17 所示, 该阵列带内增益达到 14 dBi 以上, 带外增益抑制在 18 dB 以上, 相比于无滤波特性的传统贴片单元构成的阵列, 滚降特性和带外抑制效果明显提升。该阵列还具有水平方向上 $\pm 60^\circ$ 的波束扫描范围, 交叉极化幅度 (相比于主极化) 在 -30 dB 以下。

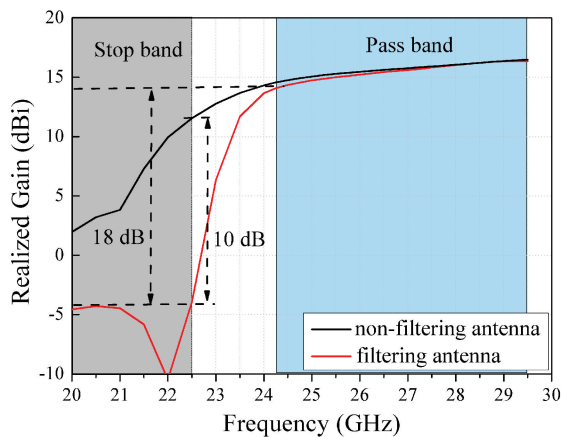
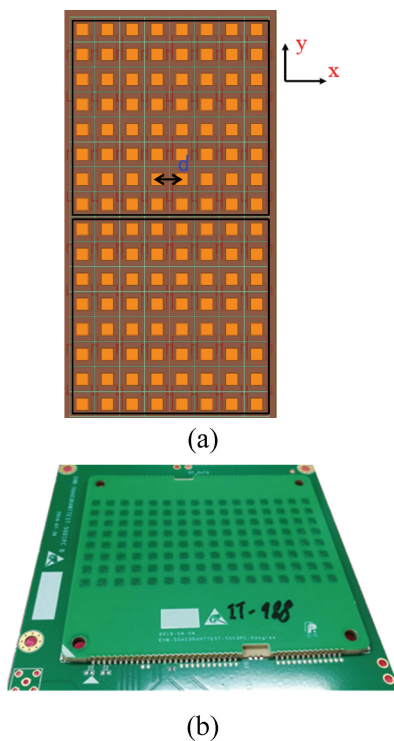
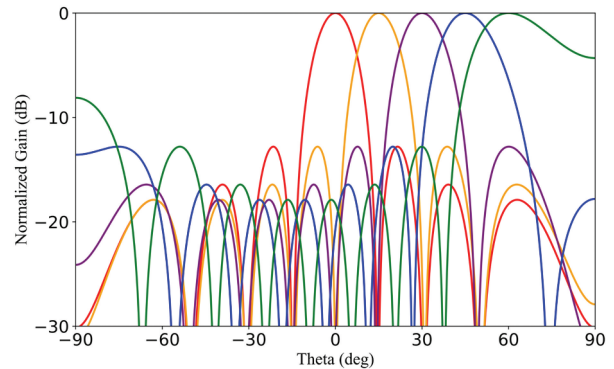


图 17 图 16 中的滤波天线增益曲线对比图

图 18 8×16 大规模双极化毫米波天线阵列 (a) 结构图 (b) 实物图

3.3 5G 毫米波 Massive MIMO 天线阵列

如图 18 所示,本课题组基于贴片天线单元构建了 8×16 的大规模毫米波 MIMO 天线,天线阵列的工作频率为 24.25~27.5 GHz,构成的有源大规模天线阵列增益可以达到 24 dBi 以上。贴片天线单元采用单层辐射贴片。整个天线阵列的馈电网络采用共面波导结构实现。天线阵列在水平方向的单元间距约为 0.48λ 。如图 19 所示,在此单元间距下,可在水平方向上实现 $\pm 60^\circ$ 的扫描,并且不出现较高的远旁瓣,同时可保证单元间互耦处于较低的范围。在 $0 \sim 60^\circ$ 扫描范围内的旁瓣均低于 -8 dB。

图 19 图 18 中的天线阵列在水平方向 (x - z 平面) 扫描的方向图

4 结论与展望

本文介绍了面向 5G 的滤波天线技术及其在基站天线阵列中的应用。提出的三种无额外滤波电路的 sub-6 GHz 频段的双极化滤波天线,尺寸紧凑、结构简单,具有良好的带内辐射性能和带外抑制特性。基于滤波天线单元设计了两种双频共口径天线阵列,实现了多系统天线的高度集成,比相关行业产品更紧凑,适合应用于多频基站系统。此外,提出的两种 5G 毫米波滤波天线具有很好的边带滚降效果和较高的增益,可克服毫米波频段滤波器损耗大或者难集成的问题,在此基础上设计了毫米波 MIMO 天线阵列。

尽管滤波天线及基于滤波天线的双频共口径技术研究取得了一些进展,但是目前的异频共口径阵列天线主要是双频,未来还需要向宽带、多频方向拓展,以兼容更多频段支持更多的系统。此外,还需要研究微波与毫米波频段共口径设计技术,进而形成完善的多频共口径阵列天线设计理论与方法。另外,在异频共口径阵列天线中还会存在一个阵子遮挡另外一个阵子的情况,导致方向图畸变和辐射效率降低,特别是在宽带的情况下该问题更加突出,这也是未来需要解决的一个问题。

参考文献

- [1] IMT-2020(5G)推进组, 5G 概念白皮书, 2015, 2.
- [2] He YJ, Yue YD, Shen ZX. A novel broadband dual-polarized antenna element for LTE700 MHz/GSM850 MHz/GSM900 MHz applications. *IEEE Access*, 2016, 4: 4321—4326.
- [3] Sun HH, Ding C, Zhu H, et al. Suppression of cross-band scattering in multiband antenna arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(4): 2379—2389.

- [4] Zhu YF, Chen YK, Yang SW. Decoupling and low-profile design of dual-band dual-polarized base station antennas using frequency-selective surface, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(8): 5272—5281.
- [5] Mao CX, Gao S, Wang Y, et al. Dual-band patch antenna with filtering performance and harmonic suppression. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(9): 4074—4077.
- [6] Tang MC, Chen Y, Shi T, et al. Bandwidth-enhanced, compact, near-field resonant parasitic filtennas with sharp out-of-band suppression. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(8): 1483—1487.
- [7] Lee CH, Chen HH, Shih WT, et al. Balanced wideband filtering planar inverted-F antenna design. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 716—719.
- [8] Yusuf Y, Cheng HT, Gong X. Co-designed substrate-integrated waveguide filters with patch antennas. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 2013, 7(7): 493—501.
- [9] Chuang CT, Chung SJ. A compact printed filtering antenna using a ground-intruded coupled line resonator. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2011, 59(10): 3630—3637.
- [10] Zhang XY, Duan W, Pan YM. High-gain filtering patch antenna without extra circuit. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2015, 63(12): 5883—5888.
- [11] Ding CF, Zhang XY, Zhang Y, et al. Compact broadband dual-polarized filtering dipole antenna with high selectivity for base-station applications. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2018, 66(11): 5747—5756. base-station applications. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2018, 66(11): 5747—5756.
- [12] Bautista MG, Zhu H, Zhu X, et al. Compact millimeter-wave bandpass filters using quasi-lumped elements in 0.13- μm (Bi)-CMOS technology for 5G wireless systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(7): 3064—3073.
- [13] Martinez JA, De Dios JJ, Belenguer A, et al. Integration of a very high quality factor filter in empty substrate-integrated waveguide at Q-band. *IEEE Microwave & Wireless Components Letters*, 2018, 28(6): 503—505.
- [14] Duan W, Zhang XY, Pan YM, et al. Dual-polarized filtering antenna with high selectivity and low cross polarization. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(10): 4188—4196.
- [15] Cao YF, Wu YF, Pan YM, et al. A method of generating radiation nulls utilizing inherent resonance modes for dual-polarized filtering dipole antenna design. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, to be published.
- [16] Ding CF, Zhang XY, Yu M. Simple dual-polarized filtering antenna with enhanced bandwidth for base station applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, to be published.
- [17] Duan W, Cao YF, Pan YM, et al. Compact dual-band dual-polarized base-station antenna array with a small frequency ratio using filtering elements. *IEEE Access*, 2019, 7: 127800—127808.
- [18] Zhang XY, Xue D, Ye LH, et al. Compact dual-band dual-polarized interleaved two-beam array with stable radiation pattern based on filtering elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(9): 4566—4575.
- [19] Yang SJ, Pan Y, Shi L, et al. Millimeter-wave dual-polarized filtering antenna for 5G application. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, to be published.

5G Filtering Antenna and Array in Sub-6 Ghz and Millimeter-wave Frequency Band

Cao Yunfei Yang Shengjie Zhang Xiuyin*

School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641

Abstract From 1G (generation) to 5G in mobile communications, the development of antennas has evolved from single arrays to multiple arrays, from narrowband to wideband, from simple MIMO (multiple-input multiple-output) to massive MIMO arrays. In current 5G systems, antennas in the sub-6GHz (Sub-6GHz) frequency band need to cover multi-bands for different communication standards, so multiband shared-aperture antenna arrays become very important. In the 5G millimeter-wave band, the antennas are facing the problems of high loss and large size. These needs can be fulfilled by filtering antenna technology. This paper introduces the technologies of sub-6GHz filtering antenna element and multi-band shared-aperture

* Corresponding Author, Email: zhangxiuyin@scut.edu.cn

base-station antenna array based on filtering antennas. The out-of-band suppression function of the filtering elements is used to realize the cross-band decoupling. In addition, millimeter-wave filtering antenna and antenna array are also introduced. A 5G millimeter-wave massive MIMO antenna operating in the 24.25~27.5 GHz can achieve a beam scanning of $\pm 60^\circ$ in the horizontal direction.

Keywords filtering antenna; multiband antenna; shared-aperture antenna; Massive MIMO antenna; millimeter-wave antenna

(责任编辑 姜钧译 吴妹)

· 成果快报 ·

我国学者观测到范德瓦尔斯层间堆叠结构对二维磁性的调控

在国家自然科学基金项目(批准号:11427902, 11674063)等的资助下,由复旦大学与美国华盛顿大学等单位合作,基于自主设计和研制的低温强磁场非线性磁光显微镜和自旋极化扫描隧道显微镜,在二维磁性材料双层三碘化铬(CrI_3)中发现了由范德瓦尔斯层间堆叠结构关联的铁磁、反铁磁性,为理解范德瓦尔斯作用下的磁耦合机理提供了关键性的实验证据。两项成果以“Giant Nonreciprocal Second-harmonic Generation from Antiferromagnetic Bilayer CrI_3 ”(反铁磁双层三碘化铬中巨大的非互易二次谐波产生)和“Direct Observation of Van der Waals Stacking-dependent Interlayer Magnetism(范德瓦尔斯堆叠依赖的层间磁耦合的直接观测)”为题,分别于2019年8月和11月发表在 *Nature*(《自然》)和 *Science*(《科学》)杂志上。文章链接:<https://www.nature.com/articles/s41586-019-1445-3> 和 <https://science.sciencemag.org/content/366/6468/983>。

近年来,新兴的二维磁性材料备受瞩目。由于二维磁性材料的范德瓦尔斯作用力较弱,层间堆叠结构可以在原子级尺度进行人工设计和制造,进而有可能影响其磁耦合特性,为新型二维自旋器件的研制提供新思路。然而,层间堆叠方式与磁耦合效应间的关联机制不甚明晰,缺乏直接的实验证据。

针对这一问题,复旦大学物理学系吴施伟、高春雷教授与美国华盛顿大学许晓栋教授合作,在双层磁性半导体双层三碘化铬(CrI_3)中观测到源于层间反铁磁结构的非互易二次谐波非线性光学响应。进一步通过观测偏振极化的二次谐波信号,发现双层三碘化铬的堆叠结构不具备三重旋转对称性,与体材料的低温结构菱形(rhombohedral)晶系存在矛盾。深入对比发现,双层三碘化铬却与体材料的高温结构单斜(monoclinic)晶系相吻合,都具有镜面对称性。这一结果和国际上新近发表的关于范德瓦尔斯堆叠结构与层间铁磁、反铁磁耦合的关联作用的理论计算结果相吻合,进而为理解双层三碘化铬的层间反铁磁耦合提供了第一手的实验证据。非线性二次谐波也成为研究二维磁性的新方法。

随后,该团队运用原位化合物分子束外延生长技术和自旋极化扫描隧道显微镜相结合的实验手段,在原子级层面精确地测量到双层二维磁性半导体溴化铬(CrBr_3)层间堆叠与磁耦合之间的关联。前期研究表明, CrBr_3 和 CrI_3 的体材料和单层薄膜都具有面外易轴的铁磁性,且两者体材料的晶体结构相似。然而,经由机械剥离而得的双层 CrI_3 和 CrBr_3 却分别呈现出了反铁磁性和铁磁性,这一反常现象引起了人们的广泛研究兴趣。在实验中,团队发现双层的 CrBr_3 具有两种不同的转动堆叠结构(H型和R型),这两种原子结构均是在相应体材料中从未发现过的全新堆叠结构。在H型堆叠的 CrBr_3 双层膜上观测到了铁磁性的磁各向异性,而在R型堆叠上却观测到了层间反铁磁构型。

这一实验发现率先在原子级尺度阐明了 CrBr_3 堆叠结构与层间铁磁、反铁磁耦合的直接关联,为理解三碘化铬家族中不同成员的迥异磁耦合提供了指导,有望为新型二维自旋器件提供全新的研制思路。

(供稿:数理科学部 姜向伟 倪培根 陈刚 郭海中)