

基于 SSPP 技术的家庭网络多波束天线技术研究及应用

石胜兵, 邵金进, 石操

(华为技术有限公司, 广东 深圳 518129)

摘要: 大带宽、广覆盖、低时延和抗干扰的高品质家庭无线网络是保障光纤入房 (FTTR, fiber to the room) 千兆光网用户体验的关键指标, 传统家庭网络设备主要采用单波束单极化天线设计, 在大衰减、强干扰背景下已经越来越无法满足高品质的网络产品需求。天线作为实现传导能量与空口电磁波变换必不可少的部件, 利用其设计自由度可以实现多重功能。高增益能降低射频端的功耗需求, 达到节能的目的, 多波束能保持无死角的高性能网络覆盖, 因此研究设计小尺寸、高增益且用法灵活的多波束天线价值巨大。紧跟实际工程痛点和当前学术研究方向, 瞄准家庭网络产品设计开发了一种基于人工表面等离激元 (SSPP, spoof surface plasmon polariton) 技术的家庭网络多波束天线, 覆盖 Wi-Fi 的 5.1~5.9 GHz 频段。实际测试验证表明, 基于 SSPP 技术的天线设计能够获得更好的覆盖性能, 相比传统小天线, 在穿墙、跨层等弱信号场景下具有明显优势, 在小型化的家庭网络产品中具有极大的应用前景。

关键词: 家庭网络; 多波束; 高增益; 人工表面等离激元

中图分类号: TN919

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2023.00321

Research and application of multi-beam antenna technology for home network based on SSPP technology

SHI Shengbing, SHAO Jinjin, SHI Cao

Huawei Technologies Co., Ltd., Shenzhen 518129, China

Abstract: High-quality home wireless network with large bandwidth, wide coverage, low latency and anti-interference is the key indicator to ensure user experience of fiber to the room (FTTR) Gigabit optical network. Traditional home network equipment mainly adopts single-beam single-polarized antenna design, which has become increasingly unable to meet the needs of high-quality network products under the background of large attenuation and strong interference. Antenna, as an indispensable component to realize conduction energy and air-interface electromagnetic wave transformation, can realize multiple functions by using its design freedom. High gain can reduce the power consumption of the radio frequency (RF) side to achieve the purpose of energy saving, and multi-beam can maintain high-performance network coverage without dead ends. Therefore, designing a multi-beam antenna with small size, high gain and flexible usage is of great value. Following the practical engineering and current academic research, a multi-beam antenna based on spoof surface plasmon polariton (SSPP) technology, covering the 5.1~5.9 GHz frequency band of Wi-Fi, was designed for home network products. Compared with traditional antennas, the test results of the antenna based on SPSS technology show that the coverage performance of the network in weak signal scenarios such as through-wall and cross-layer scenarios is improved greatly. It has great application prospects in increasingly miniaturized home terminal products.

Key words: home network, multi-beam, high gain, spoof surface plasmon polaritons

收稿日期: 2022-08-24; 修回日期: 2023-03-07

通信作者: 石胜兵, shishengbing1@huawei.com

0 引言

信息通信的发展即将构造万物互联的智能世界,无线网络协议的演进在不断满足网络性能需求的同时,要求网络带宽越来越宽,天线规格越来越高。面向万物互联的时代背景,未来大带宽、全覆盖、全应用将是家庭网络的发展趋势^[1-4]。天线作为网络通信的关键器件,需要具备更高规格的发展要求。

首先,随着 Wi-Fi 协议的快速演进,天线需要的频段和数量越来越多,意味着天线间距和尺寸越来越小,高隔离度、多输入多输出(MIMO, multiple-input multiple-output)性能将成为瓶颈。IEEE 802.11 物理层网络协议迭代见表 1,从 IEEE 802.11n 网络协议支持的 40 MHz 带宽和 4×4 MIMO 到 IEEE 802.11be 支持的 320 MHz 带宽和 16×16 MIMO,网络传输速度的提升要求天线数目越来越多;而在家庭网络通信中承担信息交换的网关设备体积却渐渐小型化,预留给天线的布局架构尺寸越来越小。因此,设计尺寸小、性能高的新型 Wi-Fi 天线成为迫在眉睫的诉求。

其次,天线需要广覆盖、多极化、多波束的特

性。万物互联从家居互联开始,家庭网络的接入设备不仅有多样化的手机、平板计算机、计算机等通信产品,还有智能灯、冰箱、窗帘、监控等种类繁多的家居产品,电视、音箱等娱乐产品,跑步机、运动手环等运动健康产品^[5]。简要智能家居示意图如图 1 所示,差异化的终端设计、功能定位以及用户的使用喜好,使得不同终端间的天线性能参差不齐,包括无源辐射性能、工作极化、波束指向、安装方式等。当前家庭 Wi-Fi 网络是室内无线接入使用最多、最容易被抱怨的媒质,承担了室内类小基站的作用,如何提升家庭网关的性能,实现不同终端设备的自适应接入是保障用户体验的重点。因此, Wi-Fi 天线不但需要满足全应用、广覆盖,还需要满足多极化、多波束的自适应能力。

最后,天线需要高增益、抗衰减、抗干扰能力。传统全向天线虽然使用方式简单,覆盖全向,但增益低、极化单一,在现实的家居环境中,穿墙跨楼大衰减后的网络信号弱、邻居及家庭内多接入点(AP, access point)干扰强等现象导致体验差的问题突出。家居环境及天线波束需求示意图如图 2 所示。为了使网络能够穿越墙壁或跨楼层传递到每一个角落,除了不断提升射频发射功率外,采用更高增

表 1 802.11 物理层网络协议迭代

IEEE 802.11 物理层协议	发布时间	频率/GHz	最大带宽/MHz	每条流的最大速率/(Mbit·s ⁻¹)	MIMO 支持
11n (Wi-Fi 4)	2009 年 10 月	2.4/5	40	150	4
11ac (Wi-Fi 5)	2013 年 12 月	5	160	866.7	8
11ax (Wi-Fi 6)	2020 年 1 月	2.4/5/6	160	1 201	8
11be (Wi-Fi 7)	—	2.4/5/6	320	1 875	16



图 1 简要智能家居示意图

益的网关天线以对抗空间和障碍物的信号衰减也是一种重要途径。与此同时，高增益网络的覆盖、多设备接入的并发通信严重影响家庭网络的通信质量，借助高增益高前比比的定向波束实现不同设备的选择性接入，能够较好地提升家庭网络产品硬件的抗干扰能力。

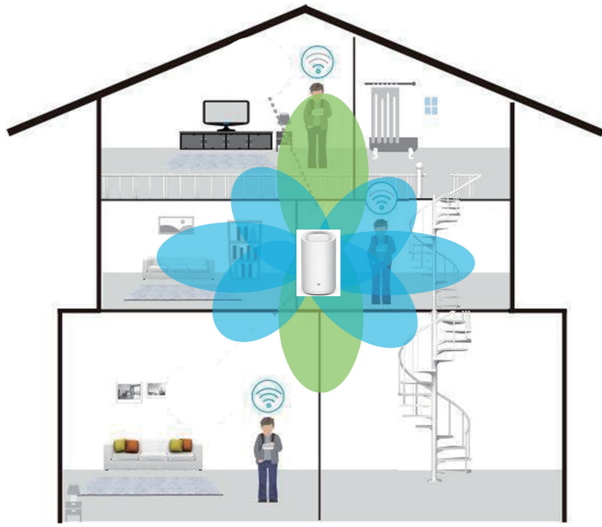


图2 家居环境及天线波束需求示意图

基于以上需求，为满足高品质的网络体验，设计多极化、多波束、高性能的天线方案，以多波束的优势提升天线增益，增强远距离覆盖、跨层及穿墙性能；以更多的波束满足3D 720°全空间高性能网络覆盖，提升多设备、多用户接入连接的可靠性；以更窄的波束提升信道抗干扰特性，突破目前家庭网络天线设计在增强覆盖、物理抗干扰、差异化终端接入等方面的界限和瓶颈，是迎合无线通信技术发展和未来家庭网络市场需求的重要发展方向^[6]。

传统的天线单元及其阵列普遍存在两个问题。一是高增益和小尺寸之间的矛盾；二是单模天线与多波束之间的矛盾。传统的线性阵列只能实现一维波束覆盖，要想实现多维度覆盖需要复杂的二维馈电网络及大量有源器件，这大大增加了天线的制造成本和设计复杂度。人工表面等离激元（SSPP, spoof surface plasmon polariton）是一种新的天线结构形式。SSPP起源于光学频段的表面等离激元（SPP, surface plasmon polariton），在光频率下由于金属的负介电常数特性，SPP波被紧束缚在金属和介质的交界面上，在垂直于交界面的方向上，电磁波能量呈指数衰减，而在沿着

交界面的方向上，电磁波向前传输。SSPP结构具有宽频带、高效率、高束缚、多模式、易于集成和弯折等优点，并且其在法向方向上的电磁波呈指数衰减，易于小型化，被广泛应用于宽带吸收器^[7]、微波电路^[8]、天线^[9-13]、偏振调制器^[14]和动态可调谐集成器件^[15]等领域。

但是目前的SSPP天线的形式比较单一，大多仅能在一种模式下工作，其天线单元仅仅具有一个定向波束，并且缺少SSPP天线在Wi-Fi频段的研究与应用。本文基于SSPP结构的特点，提出了一种同时具有定向双波束和全向波束的SSPP天线，并将其应用到了家庭网络产品中，实验结果表明该天线的实用性和适用性优势。

1 多波束天线

在类终端的家庭网络产品中，ID小型化是设计演进的主流趋势，这使得天线的设计需要追求达到尺寸、性能和成本的极致，特别是多波束、多天线设计背景下，极致平衡问题尤为突出。首先，不同ID的终端设备产品形态、设计规格和整机集成环境对天线尺寸及安装固定进行了多种约束，天线设计面临的挑战愈加严酷；其次，家庭网络带宽和通信速率不断提升，如何提升信道质量、逼近理论容量成为对天线设计的新要求。最后，Wi-Fi规格的升级对天线与射频通路的级联提出了很严格的低成本设计要求，如何降低复杂度/成本也是设计的重要一环。目前，家庭网络产品中的多波束天线主要包括：基于机械扫描的多波束天线、基于射频开关的多波束天线和基于特征模式的多波束天线。

1.1 基于机械扫描的多波束天线

基于机械扫描的多波束天线网络产品如图3所示，基于机械扫描的多波束天线最早主要应用在雷达天线方面，通过机械转轴360°转动高增益定向天线，从而获得360°的全向高性能覆盖性能^[16-17]。近年来，为解决视频摄像机对环境的强依赖问题，360°可旋转扫描雷视一体机逐渐发展起来，其雷达天线借助机械电机转动，可对可视角度区域进行扫描成像^[18]，如图3(a)所示。在2022国际消费类电子产品展览会（CES, international consumer electronics show）上，TP-Link首次将机械扫描技术应用到家庭网络产品中，展示了其新型的多波束天线路由器原型机，如图3(b)所示。该路由器搭载了4根天线，

4根天线分别架设在可独立旋转的电机上,天线可根据终端设备位置自适应旋转,始终保持终端设备具有良好的网络体验。



(a) 360°可旋转扫描雷视一体机



(b) TP-Link三维机械扫描式多波束Wi-Fi天线路由器原型机

图3 基于机械扫描的多波束天线网络产品

从天线的本体而言,机械扫描式多波束天线的每根天线本体只有一种波束,空间多波束覆盖依靠电机转动天线实现。从尺寸上看,天线系统尺寸和重量均比传统天线系统庞大;从性能上看,机械扫描式多波束天线系统可以充分利用每根天线的高增益特性,通过增益叠加,实现不同区域的高增益覆盖;从成本上看,相比于传统天线阵列增加了电机和控制成本。总体而言,它利用尺寸和成本换取性能收益。

1.2 基于射频开关的多波束天线

基于射频开关的多波束天线也称为方向图可

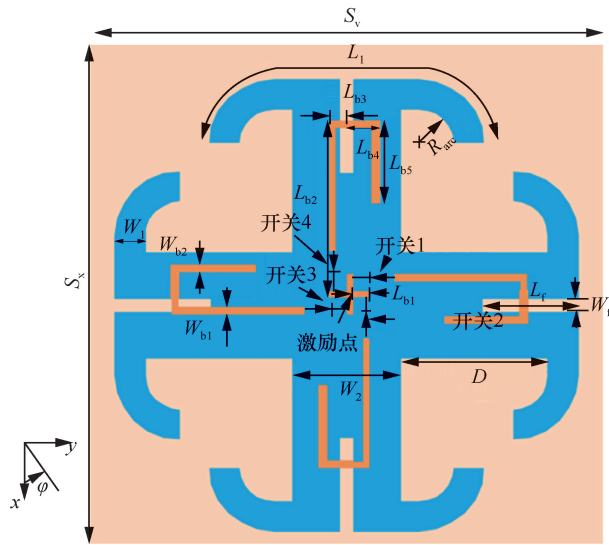
重构天线^[19-21]。可重构天线分为频率可重构天线、方向图可重构天线、极化可重构天线和多电磁参数可重构天线^[22],其本质是改变天线的辐射结构或辐射结构上的电流分布。根据家庭网络产品形态和小型化、高增益、多极化、多波束的天线应用需求,方向图可重构天线将是未来家庭网络天线的重点应用方向^[23]。

基于射频开关的多波束天线如图4所示^[20],可重构天线结构示意图如图4(a)所示,该天线由4个弧形的dipole天线组成,每一个dipole天线覆盖90°的平面空间,各dipole天线与激励馈线之间用PIN二极管连接,通过控制PIN二极管的通断,改变天线的可用辐射单元,从而实现方向图的可重构功能,各阵子单元辐射时的水平面方向图如图4(b)所示。应用到家庭网络产品中,可以根据终端设备位置利用算法切换工作天线,达到空间多波束的目的,从而实现目标区域的高增益天线网络覆盖需求。

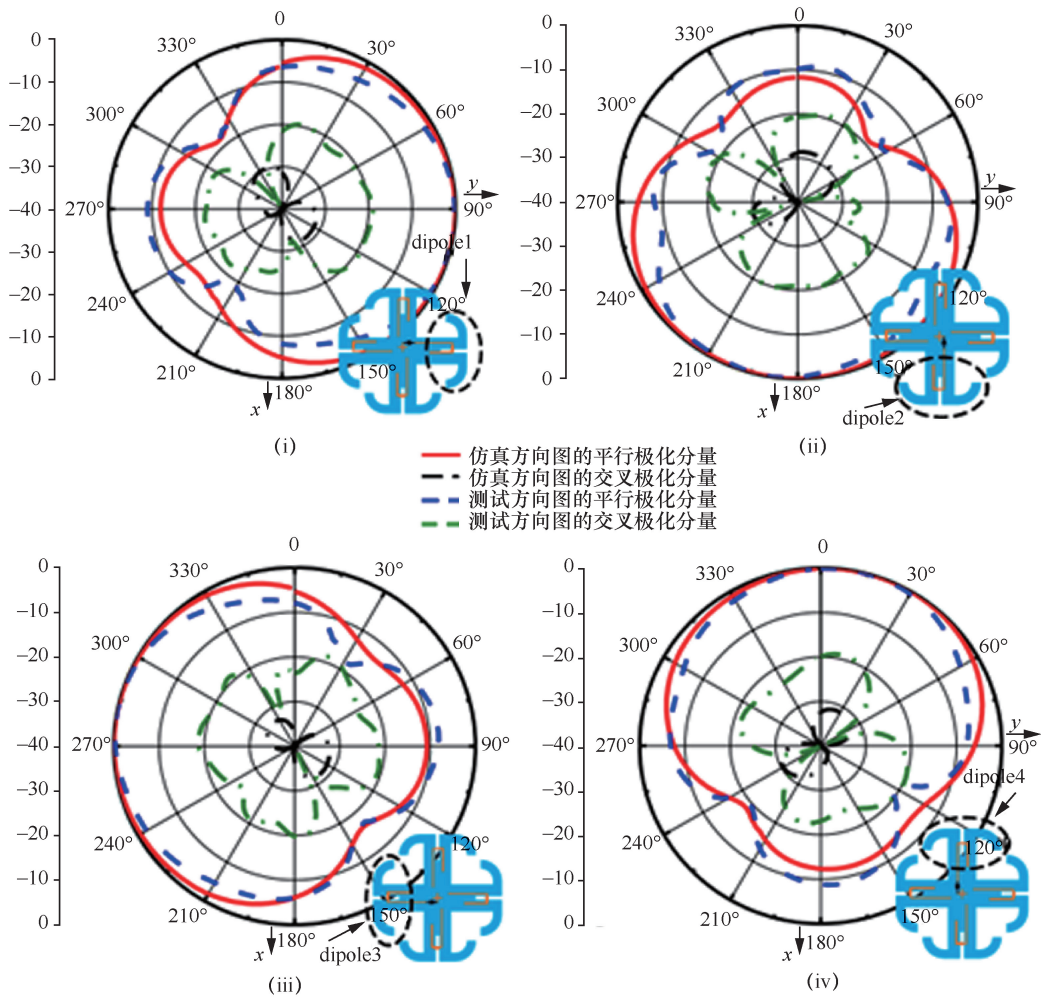
相比机械扫描式多波束天线,射频开关多波束天线采用电控替代了电机的转动,质量上轻便许多。尺寸上,天线结构比较紧凑,集成度较高;性能上,各个方向均有较高的天线增益;成本上,相比于传统天线系统,它增加了射频开关和不同方向的辐射单元导致成本上升,但是相比于机械扫描式多波束天线系统,它的成本也是可以接受的。

1.3 基于特征模式的多波束天线

基于特征模式的多波束天线根据模式理论,通过改变激励源的位置或相位来激发辐射体的不同谐振模式,当激励出的模式频率与初始激励模式频率不同时,该辐射天线就形成了多频天线;当激励出的模式频率与初始激励模式频率相同时,可以形成阵列天线,从而达到多波束的效果^[24-25]。近几年,利用特征模式理论实现超宽带、多极化、多波束天线的学术研究甚多,共模/差模天线^[26]是受到关注较多的一种。共模/差模天线可以视为一种小型化的“相控”天线^[27],其基本理论是将传统的天线同轴馈线替换成差分线,通过控制差分线上信号的同相(共模)和异相(差模),使得天线本体上的电流分布呈现出两种形态,获得多极化多波束特性。dipole天线辐射方向图如图5所示^[26],图5(a)为普通dipole天线的差模激励方向图,为标准的“苹果图”;图5(b)为dipole天线在共模激励下的方向图,呈左右辐射状态。



(a) 可重构天线结构示意图



(b) 各阵子单元辐射时的水平面方向图

图 4 基于射频开关的多波束天线^[20]

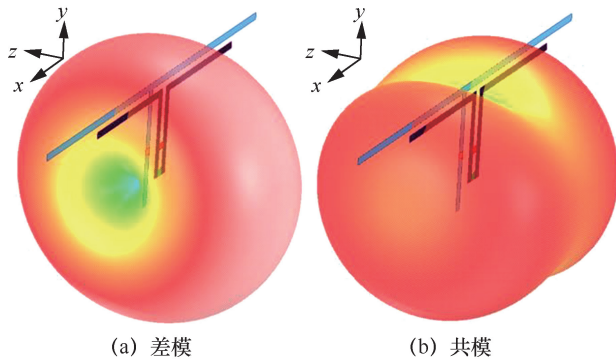


图5 dipole 天线辐射方向图^[26]

与其他几种多波束天线相比，基于特征模式的多波束天线充分利用了辐射体的谐振模式，天线集成度非常高，天线尺寸较小；但是因其谐振和尺寸特性，通常它的增益不会很高。当前，这种设计主要应用在智能终端设备上，天线的小型化和共模设计都依赖地板参与工作，带宽、隔离度以及方向图的设计均会受到地板的影响，因此这种天线依赖地板而无法独立使用，主要应用在消费类终端设备中，以追求极致小尺寸和净空为主要目的。

最近几年在学术界研究比较火热的另一种特征模式多波束天线是基于 SSPP 的多波束天线，利用 SSPP 结构中的不同辐射体实现奇偶模的独立工作，最终实现单天线双模高增益的多波束特性。这种天线在尺寸、性能、成本上都有着较好的表现，非常匹配家庭网络产品，是面向高集成、高增益、多波束天线演进的重要研究方向。

2 基于 SSPP 的多波束天线

常规单波束天线虽然可以通过定向设计做高增益，但天线波束不可调控，并且通过多天线堆叠方式实现全向覆盖时，天线数量和集成代价大^[28]，

在面向极致小尺寸 ID 设计需求时，存在无法应用到实际产品设计的风险。SSPP 是 SPP 概念在低频段的类比延伸，是电磁波与人工电磁媒质相互作用时在媒质界面产生的一种混合表面电磁模式，具有深亚波长、局域场增强以及非线性色散等特性^[28]。得益于 SSPP 的深亚波长特性，基于 SSPP 的新型电磁器件具有结构紧凑、质量轻、低成本等应用优势。对于 SSPP 结构天线，偶模模式下电磁波在 SSPP 结构上可以产生驻波，激发出边射波束，而在奇模模式下的电磁波在 SSPP 结构上可以产生行波，激发出高增益的端射波束，这一特性使得 SSPP 结构在高增益多波束可重构天线中具有巨大的应用潜力^[29]。当前传统的 SSPP 天线大多只有一个定向波束，无法满足家庭网络产品的 Wi-Fi 全向覆盖需求，而采用阵列天线波束拼接方式达到的全向覆盖，由于天线尺寸太大、成本较高，不适于产品的应用需求。本文采用中心耦合馈电的方式，充分利用 FR4 单板的正反面空间及 SSPP 的奇偶模辐射特性，在 SSPP 结构中间采用水平和垂直的偶极子天线同时进行馈电，获得了上下端射的两个定向波束和全向波束，解决了传统 SSPP 天线波束覆盖较窄的问题，同时在相同的天线波束覆盖空间需求下极大地降低了天线数量和应用成本。

双波束 SSPP 天线结构的正反面（卧式摆放）如图 6 所示，为一种 Wi-Fi 5G 频段的双波束 SSPP 天线，天线整体尺寸为 $108\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ ($2\lambda \times 0.28\lambda \times 0.01\lambda$)，天线结构包含 3 个部分：介质板（图示蓝色部分）、位于介质板正面两侧的 SSPP 结构（图示两端黄色部分）和分别位于介质板正/背面中心位置的偶极子（图示中间黄色部分）。天线的激励同轴馈电线分别连接在偶极子的两个辐射臂，

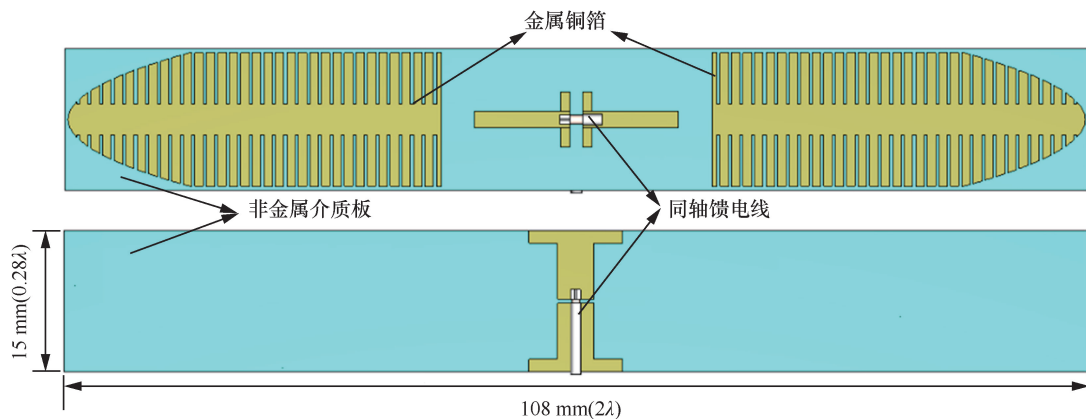


图6 双波束 SSPP 天线结构的正反面（卧式摆放）

天线的 SSPP 结构分别被垂直极化和水平极化的偶极子激励出偶模驻波模式和奇模行波模式，获得水平全向和上下端射的双波束效果，双波束 SSPP 天线 5.5 GHz 局部电流分布及辐射方向图如图 7 所示。该天线在正面垂直极化偶极子激励时偶模模式下的电流分布如图 7(a)所示，电磁场在天线结构轴线的两端呈驻波状态，偶模模式全向辐射方向图如图 7(b)所示，其增益达到 4.49 dBi，并且 E 面波束宽度较好。该天线在背面水平极化偶极子激励时奇模模式下的电流分布如图 7(c)所示，电磁场在天线结构轴线的两端呈行波状态，奇模模式垂直端射方向图如图 7(d)所示，其最大增益达到 6.24 dBi。相较于传统小天线，增益均有了较大提升，并且这两种模式可以同时存在，极大地缩减了天线的尺寸空间。此外，SSPP 结构可以直接双面印刷在介质基板上，天线成本也是极低的。该 5G SSPP 双波束天线相较于传统的全向天线，新增了上下垂直方向的波束；而相较于其他 SSPP 天线，该天线具有更

多的波束数量和波束宽度，并且在同等波束覆盖时具有更低的应用成本，几种天线参数对比见表 2。

目前，国内外的家居环境主要分为平面多房间穿墙环境和上下多层穿层环境两种，网络覆盖方式主要有 Wi-Fi 组网和单网关覆盖两种。对于组网方式，为了保证全屋网络性能，需要多 AP 设备级联，成本、能耗、系统简洁度上均对用户不友好。而单网关覆盖方式网络布局简洁，在成本和能耗上有明显优势，但是其 AP 产品对天线有着更高的要求：一方面需要高增益对抗穿墙和空间衰减能力，另一方面需要 720°覆盖的宽波束特性。而双模的多波束 SSPP 高增益天线特性与该天线需求不谋而合。

将设计的 SSPP 双波束天线应用到家庭网络产品中，在一立式摆放的家庭网络产品的左右侧壁和顶部区域布置 4 根所设计的 SSPP 天线。其中左右侧壁的天线波束为水平全向和上下端射空间覆盖，顶部的两个天线波束为垂直全向和水平左右端射空间覆盖，双波束 SSPP 天线的家庭网络产品及波束示意

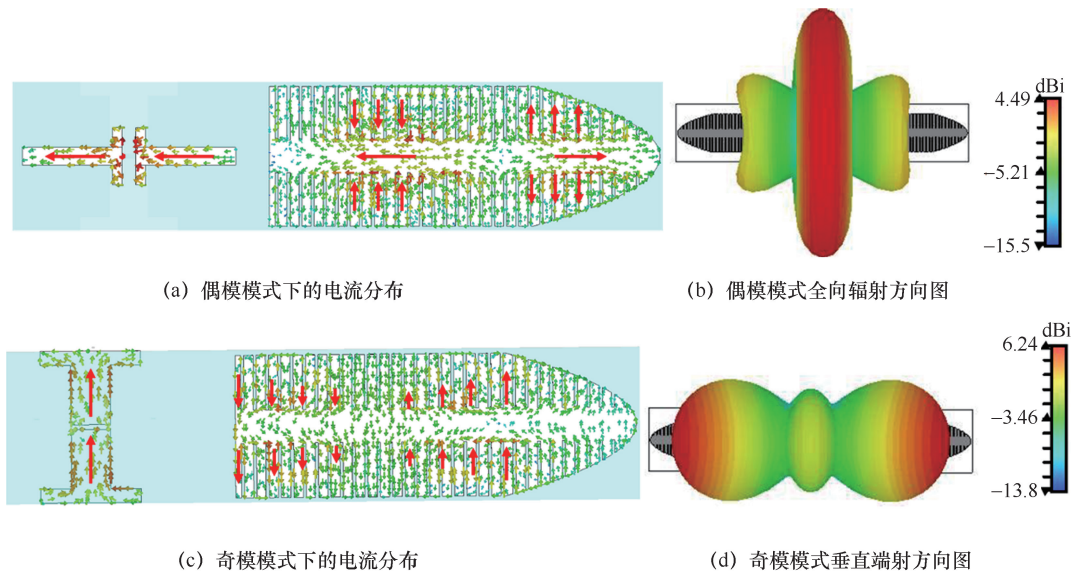


图 7 双波束 SSPP 天线 5.5 GHz 局部电流分布及辐射方向图

表 2 几种天线参数对比

天线形式	尺寸	增益/dBi	波束个数/个	覆盖范围	成本
文献[30]	$0.4 \lambda \times 0.128 \lambda \times 0.128 \lambda$	2.1	1	水平 360°	中
文献[31]	$3.3 \lambda \times 0.22 \lambda \times 0.07 \lambda$	8.2	1	水平 360°	低
文献[32]	$1.62 \lambda \times 0.53 \lambda \times 0.02 \lambda$	7.58	1	定向 15°	低
文献[20]	$0.612 \lambda \times 0.612 \lambda \times 0.06 \lambda$	4.11	1	水平 360°	高
本文	$2 \lambda \times 0.28 \lambda \times 0.01 \lambda$	4.49/6.24	3	水平 360°+上下垂直 90°	低

图如图 8 所示。选取典型的双层家居房屋作为测试环境，家居测试环境与测试点位如图 9 所示。在该测试环境中，选取一楼的 A、B、C、D、E 和二层的 F 共 6 个测试点，测试使用 SSPP 多波束天线的吞吐性能，对比市面上相同波束覆盖的 2 dBi 天线内置产品，在满足法规等效全向辐射功率（EIRP, equivalent isotropically radiated power）条件下，多波束与传统小天线性能测试对比如图 10 所示。

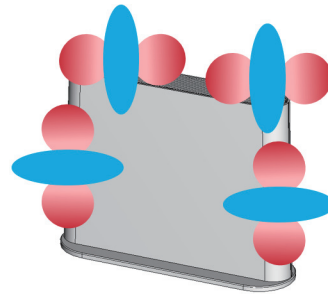


图 8 双波束 SSPP 天线的家庭网络产品及波束示意图

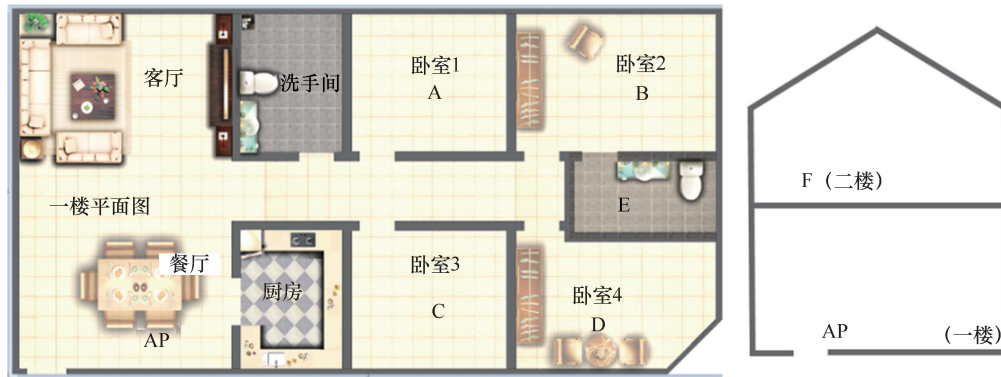


图 9 家居测试环境与测试点位

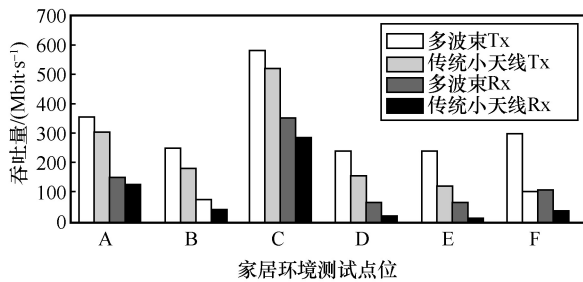


图 10 多波束与传统小天线性能测试对比

可以看出，基于 SSPP 多波束天线设备的下行 (Tx) 和上行 (Rx) 性能比使用传统小天线设备的性能高 20% 以上，在穿越 2 堵墙以上的 B、D、E 点位和跨层的 F 点位等信号衰减较大的测试点位，收益达到 70% 以上。SSPP 天线与小天线系统综合对比见表 3，在性能相同的情况下，采用 SSPP 双波束天线组成的天线系统在数量、控制复杂度和成本上均有着明显的优势。可以看出，在同样的

布局空间和成本空间下，基于 SSPP 的双波束天线组成的多波束天线系统较传统单波束小天线堆叠而成的天线系统具有更卓越的性能和更低的成本。

表 3 SSPP 天线与小天线系统综合对比

对比项	SSPP 天线系统	小天线系统
性能	★★★	★★☆
天线数量/根	4	8
复杂度	★	★★
成本	★	★★☆

此外，与上述其他多波束天线技术方案相比，几种多波束天线技术方案优缺点对比见表 4。可以看出，基于 SSPP 技术的多波束天线方案波束增益高、切换速度快，并且天线集成度高、成本低廉，在未来日益小型化、低碳化、高性能化、更广覆盖的家庭网络产品中具有极大的应用前景。

表 4 几种多波束天线技术方案优缺点对比

多波束技术方案	优点	缺点
机械扫描技术	波束增益高、波束调控角度大	扫描速度慢、尺寸大、成本相对高、不适合多用户场景
射频开关技术	波束切换速度快、抗干扰能力强	布局空间大、成本稍高、不适合多用户场景
特征模技术	集成度高、布局空间小、成本低	波束增益低、波束调控能力差、抗干扰能力差
SSPP 技术	波束增益高、集成度高、布局空间小、波束切换速度快、成本低	抗干扰能力差

3 结束语

面对广阔的市场需求与应用前景, 在绿色的目标环境下, 天线在增强家庭网络产品覆盖的应用中充满诸多挑战与机遇。本文围绕多波束天线在家庭网络产品的应用条件和前景, 从工程应用到学术研究, 概述了不同多波束天线的优缺点及可能的适用价值。介绍了 SSPP 天线在多波束天线设计上的独特优势, 同时以设计的 SSPP 多波束天线为例, 给出了它的多波束方向图及设计产品应用后的上/下行性能测试情况, 相比于传统结构及其他 SSPP 天线, 本文设计的天线具有更多的波束、更简单的设计、更低的成本、更好的产品适用性。未来的家庭网络产品尺寸越来越小, 性能要求越来越高, 720° 无死角网络覆盖需求越来越强烈, 多波束天线将会是家庭网络天线的发展趋势, 同时, 天线的尺寸、性能和成本的极致追求也会是未来天线设计者的重要挑战。

参考文献:

- [1] Huawei Technologies Co., Ltd.. FTTR white paper[R]. 2020.
- [2] 童文, 朱佩英. 6G 无线通信新征程: 跨越人联、物联, 迈向万物智联[M]. 华为翻译中心译. 北京: 机械工业出版社, 2021.
TONG W, ZHU P Y. The new journey of 6G wireless communication: beyond the internet of people and the internet of things, towards the intelligent internet of everything[M]. Translated by Huawei Translation Center. Beijing: Machinery Industry Press, 2021.
- [3] ETSI. The fifth generation fixed network (F5G): bringing fiber to everywhere and everything[EB]. 2020.
- [4] 中国信息通信研究院. 5G 经济社会影响白皮书[R]. 2017.
China Academy of Information and Communications Technology. 5G economic and social impact white paper[R]. 2017.
- [5] IMT-2020(5G)推进组. 5G 技术白皮书[R]. 2015.
IMT-2020(5G) Promotion Group. White paper on 5G technology[R]. 2015.
- [6] ITU-R. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond IMT-2000: M.2083-0[S]. 2015.
- [7] PANG Y Q, WANG J F, MA H, et al. Spatial k-dispersion engineering of spoof surface plasmon polaritons for customized absorption[J]. Scientific Reports, 2016(6): 29429.
- [8] SHEN X P, CUI T J, MARTIN-CANO D, et al. Conformal surface plasmons propagating on ultrathin and flexible films[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(1): 40-45.
- [9] ZHANG X F, FAN J, CHEN J X. High gain and high-efficiency millimeter-wave antenna based on spoof surface plasmon polaritons[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(1): 687-691.
- [10] FAN Y, WANG J F, LI Y F, et al. Frequency scanning radiation by decoupling spoof surface plasmon polaritons via phase gradient metasurface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(1): 203-208.
- [11] KONG G S, MA H F, CAI B G, et al. Continuous leaky-wave scanning using periodically modulated spoof plasmonic wave guide[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 29600.
- [12] LI S L, ZHANG Q Y, XU Z X, et al. Phase transforming based on asymmetric spoof surface plasmon polariton for endfire antenna with sum and difference beams[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(9): 6602-6613.
- [13] WANG C, LI Y F, FENG M C, et al. Frequency-selective structure with transmission and scattering deflection based on spoof surface plasmon polariton modes[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(10): 6508-6514.
- [14] LI Y F, PANG Y Q, WANG J F, et al. Wide band polarization conversion with the synergy of wave guide and spoof surface plasmon polariton modes[J]. Physical Review Applied, 2018, 10(6): 064002.
- [15] CHEN Z P, LU W B, LIU Z G, et al. Dynamically tunable integrated device for attenuation, amplification, and transmission of SSPP using graphene[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(5): 3953-3962.
- [16] GAWRONSKI W, CRAPARO E M. Antenna scanning techniques for estimation of spacecraft position[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2002, 44(6): 38-45.
- [17] 郑鸿, 杨晨阳, 毛士艺, 等. 机械扫描雷达和相控阵雷达中的 TWS 技术[J]. 系统工程与电子技术, 1998, 20(9): 1-6.
ZHENG H, YANG C Y, MAO S Y, et al. TWS technique in the mechanical scan radar and phased array radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 1998, 20(9): 1-6.
- [18] 陆尧. 基于雷视一体的全时空交通感知系统[J]. 中国交通信息化, 2021(2): 122-125.
LU Y. All-time traffic perception system based on integration of thunder and vision[J]. China ITS Journal, 2021(2): 122-125.
- [19] IAS A, SH A, AB A, . Design and analysis of a hexa-band frequency reconfigurable antenna for wireless communication[J]. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 2019, 98: 80-88.
- [20] JIN G P, LI M L, LIU D, et al. A simple planar pattern-reconfigurable antenna based on arc dipoles[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(9): 1664-1668.
- [21] OJAROUDI P, JAHANBAKHSH B H, AL-YASIR Y, et al. Recent developments of reconfigurable antennas for current and future wireless communication systems[J]. Electronics, 2019, 8(2): 128.
- [22] GHOSH K, DAS S. CRLH-TL based reconfigurable antennas with multiple parameter reconfigurability[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(7): 5892-5896.

- [23] PABLO Z C H, ZAHARIS Z D, YIOULTSIST V, et al. Pattern reconfigurable antennas at millimeter-wave frequencies: a comprehensive survey[J]. IEEE Access, 2022(10): 83029-83042.
- [24] SUN L B, LI Y, ZHANG Z J, et al. Self-decoupled MIMO antenna pair with shared radiator for 5G smartphones[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(5): 3423-3432.
- [25] NIE L Y, LIN X Q, XIANG S, et al. High-isolation two-port UWB antenna based on shared structure[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(12): 8186-8191.
- [26] XU H, GAO S S, ZHOU H, et al. A highly integrated MIMO antenna unit: differential/common mode design[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(11): 6724-6734.
- [27] MAILLOUX R J. Phased array antenna handbook[M]. London: Artech house, 2017.
- [28] 韩亚娟, 张介秋, 李勇峰, 等. 基于微波表面等离激元的 360°电扫描多波束天线[J]. 物理学报, 2016, 65(14): 249-256.
HAN Y J, ZHANG J Q, LI Y F, et al. 360° scanning multi-beam antenna based on spoof surface plasmon polaritons[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(14): 249-256.
- [29] 张浩驰, 何沛航, 牛凌云, 等. 人工表面等离激元超材料[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 372-391.
ZHANG H C, HE P H, NIU L Y, et al. Spoof plasmonic metamaterials[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 372-391.

[作者简介]



石胜兵 (1990-), 男, 华为技术有限公司博士后, 主要研究方向为多极化多波束天线、低成本高性能天线、无线通信技术。



邵金进 (1984-), 男, 华为技术有限公司主任工程师, 主要研究方向为 WLAN 天线设计、重构天线、阵列及相控阵天线设计等。



石操 (1983-), 男, 华为技术有限公司接入技术首席专家, 主要研究方向为 Wi-Fi 接入技术、FTTR 组网管理等。