【电子与信息科学 / Electronics and Information Science】

高阶模高增益贴片天线的分析与设计综述

洪凯东¹, 张 晓¹, 祝 雷², 陈 哲¹, 袁 涛¹

1) 深圳大学电子与信息工程学院, 广东省移动终端微波毫米波工程技术研究中心, ATR 国防科技重点实验室, 广东深圳 518060; 2) 澳门大学科技学院, 澳门 999078

摘 要: 与基模贴片天线相比, 高阶模贴片天线天然具有更大的电尺寸, 故有利于实现高增益辐射。然而, 高阶模贴片天线也存在副瓣高和带宽窄等缺陷。本文分析了采用高介电常数基板、寄生辐射抵消和缝隙加载 3 种主要的抑制高阶模贴片天线副瓣方法; 针对高阶模贴片天线的阻抗带宽特性, 评述近年来国内外关于双频和宽带高阶模贴片天线的主要研究成果; 介绍多模谐振技术及滤波天线设计方法对改善高阶模贴片天线带宽的作用, 指出未来高阶模贴片天线设计仍然面临阻抗带宽窄和天线邻模抑制问题。

关键词: 天线电波传播; 高阶模; 高增益贴片天线; 副瓣抑制; 阻抗带宽; 双频贴片天线; 宽带贴片天线
中图分类号: TN823 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2021.01069

A review on analysis and design of high-gain patch antenna under high-order-mode operation

HONG Kaidong¹, ZHANG Xiao¹, ZHU Lei², CHEN Zhe¹, and YUAN Tao¹

1) College of Electronics and Information Engineering, Guangdong Provincial Mobile Terminal Microwave and Millimeter-Wave Antenna Engineering Research Center, ATR National Key Laboratory of Defense Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

2) Faculty of Science and Technology, University of Macau, Macau 999078, P. R. China

Abstract: Compared with the fundamental-mode patch antennas, high-order-mode patch antennas inherently possess much larger radiating size, so they are good candidates for high-gain radiation. However, these antennas usually suffer from several drawbacks, such as high sidelobe level, narrow bandwidth and so on. This paper analyzes three reported techniques for sidelobe suppression of the high-order-mode patch antennas, such as high dielectric constant substrate, filed superposition from parasitic patch, and slot loading on patch. As for bandwidth enhancement, dual-band and wideband high-order-mode patch antennas proposed in recent years are reviewed in detail, and it is demonstrated that the multi-mode technique and filtering antenna theory are effective for wideband design. Finally, the design challenges for future high-order-mode patch antennas in terms of narrow impedance bandwidth and antenna adjacent mode suppression are discussed.

Key words: antenna and propagation; high-order-mode; high-gain patch antenna; sidelobe suppression; impedance bandwidth; dual-band patch antenna; wideband patch antenna

Received: 2020-03-26; **Accepted:** 2020-06-10; **Online:** 2020-10-07

Foundation: National Natural Science Foundation of China (61801298); National Key R & D Program of China (2019YFF0216602); Shenzhen Basic Research Foundation (JCYJ20180305124721920, JCYJ20190808115411853); Shenzhen Innovation and Entrepreneurship Program for Overseas High-Level Talents, China (KQTD20180412181337494); Natural Science Foundation of Shenzhen University (2019118)

Corresponding author: Professor YUAN Tao. E-mail: yuantao@szu.edu.cn

Citation: HONG Kaidong, ZHANG Xiao, ZHU Lei, et al. A review on analysis and design of high-gain patch antenna under high-order-mode operation [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(1): 69-76. (in Chinese)

随着无线通信技术的快速发展和各种无线通信产品的普及,无线通信系统对天线结构和性能的要求越来越高.贴片天线因其具有剖面低和易加工等优点被广泛用于各类无线通信设备中.然而,贴片天线的低增益特性也限制了它在中远距离无线通信中的应用^[1].为提高贴片天线的增益,近年来许多学者做了大量研究,提出了 4 种高增益技术.除了利用传统的阵列设计外,贴片天线高增益的技术大致可分为:①寄生辐射单元技术^[2-3].通过在天线同一平面上方引入额外的寄生单元来增大辐射面积.与传统阵列天线技术相比,这类天线不需要额外复杂的馈电网络,减少了馈电损耗.但是,这类天线通常都有剖面高和口径效率较低的缺点.②部分反射表面技术.在天线上方覆盖一个面积较大的周期性结构^[4]或高介电常数基板^[5],使其与底板构成一个 Fabry-Perot 谐振腔,通过腔内电磁波的多次反射增大天线的辐射面积.但是,这类天线的剖面过高,反射面离地板约半个波长,且带宽较窄.③短路加载技术^[6-7].通过在天线腔内电场较强的位置加载短路销钉,扰动贴片天线的场分布,在不改变贴片物理尺寸的情况下提高天线的谐振频率,有效增大了贴片谐振时的电尺寸.该技术可将单个贴片天线的增益提高至 11 dBi 左右,但最大可实现增益仍不够高.④高阶模谐振技术^[8-31].通过用高阶模代替低阶基模,使贴片天线获得更大的谐振尺寸.以矩形贴片天线为例,工作于 TM_{03} 模时的辐射面积是它工作于 TM_{01} 模时的 9 倍.相比前 3 种高增益技术,高阶模贴片天线维持了极低的剖面,单元辐射面积大,不需要额外的寄生结构就能实现高增益性能,能代替小规模阵列,简化了馈电网络并有利于提高天线的辐射效率,有重要的实用价值.

尽管高阶模贴片天线天然地有利于实现高增益,但也存在着一些固有的缺陷,如副瓣水平高和单模带宽窄等.近年来,越来越多的学者针对这些问题展开研究,本团队也提出了一系列改善高阶模贴片天线阻抗和辐射性能的分析与设计方法,本文将对国内外研究现状作全面的综述.

1 高阶模贴片天线的副瓣抑制技术

大多数高阶模贴片天线的辐射方向图具有较高的副瓣水平,其形成机理既可以从等效磁流模型的角度来分析,也可以从贴片表面电流分布的角度来

理解.以矩形贴片天线为例,由两个辐射边产生辐射,可等效为两个磁流元构成的二元阵,当它们之间的距离大于 $1/2$ 真空波长时,辐射副瓣开始出现.通常情况下,高阶模贴片天线两个辐射边之间的距离远大于 $1/2$ 真空波长,因而副瓣电平较高.除此之外,从电流分布的角度来看,高阶模贴片表面的电流出现了反相分量,导致产生副瓣辐射.综合文献报道的副瓣抑制技术,大多是从这两方面出发,主要分为以下 3 类.

1.1 采用高介电常数基板

高阶模贴片天线产生高副瓣的主要原因是天线两辐射边之间的间距过大,因此抑制副瓣最直接的方法就是减小天线的电尺寸^[8-9].2016 年,JIYAL 等^[8]提出,通过采用高介电常数的介质基板,在天线尺寸不变的情况下降低天线的谐振频率,从而减小了工作于 TM_{12} 模的圆形贴片天线(图 1(a))的电尺寸,可有效抑制天线的副瓣水平.如图 1(b),随着所采用介质基板的相对介电常数由 1.00 增至 9.80,天线的副瓣电平逐渐降低,主瓣逐渐变宽.当相对介电常数取 6.15 时,副瓣电平降幅超过 10 dB,方向系数大于 10 dBi.然而,采用高介电常数的介质基板会使天线近场储能与耗能的比值 Q 升高,阻抗带宽会变窄,效率降低,这不利于天线在宽频带环境下的正常工作.

图 1 工作于 TM_{12} 模的高增益圆形贴片天线^[8]

Fig. 1 The high-gain circular patch antenna under TM_{12} mode operation^[8]

1.2 利用寄生辐射抵消副瓣辐射

JUYAL 等^[10]以工作于 TM_{13} 模的圆形贴片天线为例, 通过引入寄生单元, 提出利用基模和高阶模辐射分量相互抵消的办法抑制副瓣. 图 2 (a) 为高增益双模圆形贴片天线的结构, 下层主贴片工作于 TM_{13} 模, 上层寄生贴片工作于 TM_{11} 模. 由图 2 (b) 可知, TM_{13} 模辐射方向图有两个副瓣, 且相邻两个瓣之间电平符号相反. 上层贴片尺寸小, 其辐射方向图没有副瓣, 且主瓣电平极性保持不变. 两天线同时激励时, 两个贴片的远场分量作矢量叠加, 其中, 下层贴片 TM_{13} 模的第 1 副瓣与上层贴片 TM_{11} 模的主瓣反相抵消, 有效抑制了高阶模的副瓣辐射, 最终实现了高达 13.79 dBi 的高增益性能, 远高于常规贴片天线, 但该天线的相对带宽(绝对带宽除以中心谐振频率)仅 1% 左右. 需要注意的是, 由于两个模式的主瓣是同相叠加, 主瓣宽度会有所增加. 从等效磁流模型的角度来看, 寄生辐射单元的引入会令相邻的两个辐射边之间的距离变小, 改变阵列因子.

图2 高增益双模圆形贴片天线^[10]

Fig. 2 The high-gain dual-mode circular patch antenna^[10]

1.3 缝隙加载技术

缝隙加载也是一种简单而有效的抑制副瓣技术^[11-17]. JUYAL 等^[11]认为, 在圆形贴片中心加载缝隙可抑制 TM_{12} 模圆形贴片天线的 E 面副瓣, 并将加载的缝隙等效为一个磁流, 该磁流产生的辐射和

圆形贴片原来的辐射在远场作线性叠加, 使天线 E 面上原来的副瓣辐射刚好被抵消. 该技术的原理和 1.2 节所述寄生辐射抵消原理类似, 但不需额外的寄生单元, 在单个贴片上便可实现, 因此更加简单. 这种基于等效磁流的分析结果虽然能很好地解释和预测天线 E 面辐射方向图的变化, 但却很难预测 H 面辐射方向图的变化情况.

本团队从贴片的表面电流分布角度入手, 提出一种能同时实现天线 E 面副瓣抑制和 H 面波宽灵活可控的加载技术^[12]. 图 3 为贴片天线表面电流密度分布及其相应的 E 面和 H 面辐射方向图. 如图 3 (a), 矩形贴片工作在 TM_{03} 模时, 其纵向电流分布和 $3/2$ 波长对称振子类似, 出现了 3 个半周期, 并且中间半周期的电流反向, 引起了 E 面副瓣辐射. 若在贴片的中间 x 轴方向上加载矩形缝隙, 中间部分的反向电流被截断, 并紧紧耦合在缝隙周围, 几乎不参与辐射, 这有效抑制了 E 面的副瓣水平并增强了天线的辐射增益. 同时, 文献[12]的分析表明, 缝隙分别加载在贴片中间和在贴片两端加载时, 贴片的横向电流强度分布是完全不一样的. 如图 3 (b), 当横向电流中间强两边弱时, H 面波宽变宽; 当横向电流两边强中间弱时, H 面波宽变窄. 因此, 可通过调节中间和两端的矩形缝隙的长度去改变贴片横向的电流强度分布, 从而获得不同波束宽度的 H 面方向图. 这类天线具有结构简单和增益高的优点, 缺点是带宽小于 2%, 仍然很窄.

图3 工作于 TM_{03} 模的矩形贴片天线^[12]

Fig. 3 Rectangular patch antenna under TM_{03} mode operation^[12]

2 高阶模贴片天线的双频高增益设计方法

双频贴片天线能使两个或多个通信制式共用一

个天线,有利于降低系统的复杂度,因此,在现代无线通信中的应用越来越广泛.为实现更好的信号覆盖,通常要求双频贴片天线在两个独立的工作频段都具有较高的增益和相似的波束宽度.但是,这样的设计难度较大,特别是当两个频段的频率比较大时,因为同一天线相对于两个频段的口径电尺寸是完全不同的,频段频率比越大,差异越明显,增益和波宽的差异也越明显.以下将从两方面对基于高阶模谐振的双频高增益贴片天线展开阐述.

2.1 传统的双频贴片天线

传统的双频贴片天线设计通常是同时激励贴片天线的基模和高阶模,并且通过开路支节或矩形缝隙等加载方式,改变高阶模的电流分布使其与基模的电流分布相类似,并将两个模式的谐振频率调节在所需要的频段处,实现双频的辐射性能. YANG 等^[18]提出了一种双频圆极化方形贴片天线,如图 4 (a),激励方形贴片的 TM_{01} 与 TM_{10} 模和 TM_{03} 与 TM_{30} 模,然后在贴片的四周和中间加载矩形缝隙,大幅降低了高阶模的谐振频率,并通过调节缝隙实现所需的频率比. ZHANG 等^[19]同样利用方形贴片

(a) 基于缝隙加载的双频贴片天线^[18]

(b) 基于开路支节加载的双频贴片天线^[19]

图 4 双频贴片天线

Fig. 4 Dual-band patch antenna

天线的 TM_{01}/TM_{10} 模和 TM_{03}/TM_{30} 模,通过在贴片天线的边上中间位置加载开路支节,调节两个模式的频率比,从而实现所需的双频性能,如图 4 (b).但是,这些天线都是通过小型化的方式抑制高阶模的副瓣,高阶模电流分布与基模的相似,所以均不能在两个工作频段内同时实现高增益.

2.2 基于高阶模谐振的双频高增益贴片天线

本团队利用短路加载和缝隙加载,设计出具有相似波束宽度的双频高增益圆形和矩形贴片天线^[20-21].文献[20]采用差分馈电的方式同时激励起圆形贴片的 TM_{11} 模和 TM_{12} 模,结构如图 5 (a).首先,通过在圆形贴片中间加载矩形缝隙,在降低 TM_{12} 模副瓣的同时提高了其辐射增益;由于矩形缝隙的长度比 TM_{11} 模的工作波长小得多,故该矩形缝隙对 TM_{11} 模的谐振频率和辐射方向图几乎没有影响.接着,在 TM_{12} 模电场较弱而 TM_{11} 模电场较强的位置加载短路销钉,使其对 TM_{11} 模的电场扰动较强而对 TM_{12} 模的电场扰动较弱,因此可以在几乎不影响 TM_{12} 模的情况下提高 TM_{11} 模的谐振频率,增大其口径电尺寸,从而提高 TM_{11} 模的辐射增益.最后,通过改变缝隙的长度和短路销钉的个数及加载位置,可以调节两模式的谐振频率.如图 5 (b) 和图 5 (c),该天线可同时在 3.6 GHz 和 5.9 GHz 的无线局域网(wireless local area network, WLAN)频段

(a) 天线结构

(b) 双频高增益贴片天线的增益和效率

(c) 贴片天线在两个频段下的E和H面辐射方向图

图 5 基于缝隙和短路销钉加载的双频高增益贴片天线^[20]

Fig. 5 Dual-band high-gain patch antenna with slot and shorting pin loadings^[20]

实现大于 10 dBi 的增益, 且具有几乎一样的波束宽度.

3 高阶模贴片天线的宽带高增益设计方法

上述基于高阶模谐振的高增益贴片天线, 虽然解决了副瓣电平过高的问题, 但带宽仍然很窄, 典型的频带带宽从百分之零点几到百分之一, 无法满足大部分无线宽带通信系统对带宽的要求. 最近, 有学者探讨了高阶模高增益贴片天线的宽带设计方法, 根据原理的不同, 主要可分为两类.

3.1 基于高阶模谐振的双模和多模宽带贴片天线

多谐振模并用是宽带贴片天线常用的设计方法, 一般通过激励起贴片天线的基模和高阶模来实现^[22-27], 但这些天线通常无法在宽带内实现高增益. 有研究表明, 利用贴片天线的两个或多个高阶模 (而非基模), 可实现宽带高增益^[28-30]. SQUADRITO 等^[28] 提出一种多模宽带高增益圆形贴片天线, 结构如图 6 (a) (i). 首先, 在 TM_{14} 模的第

2 个电流零点位置加载环形缝隙, 使圆形小贴片的 TM_{12} 模与谐振在整个圆形贴片的 TM_{14} 模的辐射场叠加, 从而抑制了副瓣并增强了天线的增益. 然后, 在小贴片加载一圈短路销钉, 并分别激励起小贴片的 TM_{11} 模和大贴片的 TM_{13} 模, 利用其远场叠加来抑制副瓣和提高增益. 最后, 通过调节短路销钉的半径、个数和加载位置, 提高了 TM_{11} 模和 TM_{13} 模的谐振频率, 使其靠近 TM_{12} 模和 TM_{14} 模, 并最终在 10.79 ~ 11.51 GHz 的宽频带内实现了高达 15 dBi 的高增益辐射性能. 为保证所加载的短路销钉不影响 TM_{12} 模和 TM_{14} 模, 短路销钉须加载在这两个模式电场较弱的位置. 除此之外, LUO 等^[29] 通过差分馈电同时激励矩形贴片天线的 TM_{03}/TM_{30} 模和 TM_{05}/TM_{50} 模, 如图 6 (b) (i). 该方法同时采用高介电常数的介质基板和利用缝隙加载的方式, 抑制两模式的 E 面副瓣; 再通过在 TM_{03} 模电场较弱的位置加载短路销钉, 调节两个谐振模式的谐振频率使其相互靠近, 达到增加带宽的目的. 如图 6 (b) (ii), 这些工作拓宽了高阶模高增益贴片天线的带宽, 但带内的增益响应仍不够平坦.

图 6 基于多模和双模谐振的宽带高增益贴片天线

Fig. 6 Wideband high-gain patch antennas under multi-mode and dual-mode operation

3.2 基于耦合谐振馈电的宽带高增益滤波天线

ZHANG 等^[31]研究发现, 高阶模贴片天线的辐射方向图更易受其邻近其他模式的干扰而恶化. 例如, 矩形贴片天线工作于 TM_{03} 模的谐振频点附近会出现很多偶模, 如 TM_{02} 模、 TM_{20} 模、 TM_{21} 模和 TM_{22} 模. 因为这些偶模的贴片表面电流呈偶对称分布, 产生的方向图并不是所需要的边射方向图, 所以高阶模宽带贴片天线的设计应抑制不需要的邻模, 以便得到稳定的辐射方向图. 为此, ZHANG 等^[31]提出一种具有滤波特性的宽带高增益贴片天线, 令缝隙加载的矩形贴片天线工作在 TM_{03} 模, 两个谐振器对贴片天线进行耦合馈电, 如图 7 (a). 谐振器和贴片两两之间存在着耦合, 构成了 CT 滤

波器结构. 由图 7 (b) 可见, 引入谐振器馈电结构后, 带外的其他偶模被很好地抑制了, 同时还在带内引入了额外的两个非辐射谐振模式, 有效拓展了天线的带宽. 而由图 7 (c) 可知, 该天线在带外引入了增益零点, 使得其具有更好的选择特性. 与 3.1 节所述的双模和多模宽带高增益贴片天线^[22-30]相比, 具有滤波特性的宽带高增益贴片天线的带内增益更平坦, 因为该滤波天线在带内只有单个辐射模 (TM_{03} 模) 工作, 所以贴片的表面电流分布和口径效率能维持稳定. 与其他工作于基模的滤波天线^[32-36]相比, 具有滤波特性的宽带高增益贴片天线的增益更高, 达 13.6 dBi, 很好地实现了带宽、增益和辐射稳定性的统一.

图 7 基于谐振器耦合馈电的宽带高增益滤波天线^[31]

Fig. 7 Wideband high-gain filter antenna fed with resonator^[31]

4 高阶模贴片天线的未来展望

近年来, 高阶模贴片天线以剖面低和辐射增益高等优势受到研究人员越来越多的关注. 本文总结分析了高阶模贴片天线的副瓣抑制和宽带技术的设计方法以及工作原理, 并指出各方法存在的问题. 为了能够同时覆盖多种通信制式以降低天线系统的复杂程度和投入成本, 未来高阶模贴片天线需要具备更宽的工作频带以及更稳定的辐射性能. 总的来说, 高阶模贴片天线的设计当前面临的问题主要包含以下两方面.

1) 增益稳定的宽带设计. 单个高阶模贴片天线能够实现的阻抗带宽相当窄, 通常只有 1% 左右, 不能满足宽带无线通信的需求. 基于高阶模谐振的多模和双模宽带技术, 利用两个或多个高阶模式来获得宽带高增益性能, 但其所实现的带内增益和波

宽都不够稳定. 这是因为不同高阶模式的电流分布和口径效率差异很大, 很难让它们在同一工作频带内实现相似的辐射性能. 因此, 如何选择多个合适的高阶模式, 并利用合适的加载技术重塑其电流分布, 在拓宽带宽的同时, 让辐射方向图保持稳定, 将是高阶模贴片天线的研究难点.

2) 高阶模贴片天线的邻模抑制. 随着阶数的升高, 贴片天线的谐振模式越来越多, 各个高阶模之间的频率距离也越来越近. 由于方向图不同, 并非每个模式都能被利用, 当一些不需要的模式落入带内时, 辐射方向图的一致性就会被破坏. 3.2 节介绍了利用 $1/2$ 波长谐振器馈电抑制了 TM_{03} 模附近的其他偶模, 实现了宽带的性能. 然而, 当高阶模式附近存在更复杂的邻模时, 模式激励和模式抑制的难度将会大增, 对馈电方式的选择和馈电结构的要求也变得更高, 这需要更深入的研究.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61801298); 国家重点研发计划资助项目(2019YFF0216602); 深圳市基础研究计划资助项目(JCYJ20180305124721920, JCYJ20190808115411853); 深圳市海外高层次人才创新创业计划资助项目(KQTD20180412181337494); 深圳大学自然科学基金资助项目(2019118)

作者简介: 洪凯东(1993—), 深圳大学博士研究生. 研究方向: 高阶模贴片天线. E-mail: kd.hong@foxmail.com

引文: 洪凯东, 张 晓, 祝 雷, 等. 高阶模高增益贴片天线的分析与设计综述[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(1): 69-76.

参考文献 / References:

- [1] 钟顺时. 微带天线理论与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991: 152-172.
ZHONG Shunshi. Microstrip antenna theory and application [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1991: 152-172. (in Chinese)
- [2] EGASHIRA S, NISHIYAMA E. Stacked microstrip antenna with wide bandwidth and high gain [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, 44(11): 1533-1534.
- [3] ENTSCHLADEN H, NAGEL U. Microstrip patch array antenna [J]. Electronics Letter, 1984, 20(22): 931-933.
- [4] TRENTINI G V. Partially reflecting sheet arrays [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1956, 4(4): 666-671.
- [5] JACKSON D, ALEXOPOULOS N. Gain enhancement methods for printed circuit antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1985, 33(9): 976-987.
- [6] SCHAUBERT D, FARRAR F, SINDORIS A, et al. Microstrip antennas with frequency agility and polarization diversity [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1981, 29(1): 118-123.
- [7] ZHANG Xiao, ZHU Lei. Gain-enhanced patch antennas with loading of shorting pins [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(8): 3310-3318.
- [8] JUYAL P, SHAFI L. A novel high-gain printed antenna configuration based on TM_{12} mode of circular disc [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(2): 790-796.
- [9] LUO Yu, CHEN Zhining. Compressed dipoles resonating at higher order modes with enhanced directivity [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(11): 5697-5701.
- [10] JUYAL P, SHAFI L. A high-gain single-feed dual-mode microstrip disc radiator [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(6): 2115-2126.
- [11] JUYAL P, SHAFI L. Sidelobe reduction of TM_{12} mode of circular patch via nonresonant narrow slot [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(8): 3361-3369.
- [12] ZHANG Xiao, ZHU Lei, WU Qionsen. Sidelobe-reduced and gain-enhanced square patch antennas with adjustable beamwidth under TM_{03} mode operation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(4): 1704-1713.
- [13] HONG Kaidong, ZHANG Xiao, ZHU Lei, et al. Slot loading effect on impedance and radiation performance of high-gain patch antenna under TM_{03} -mode operation [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2019, 29(12): e21967.
- [14] HONG Kaidong, ZHANG Cong, ZHANG Xiao, et al. Slot loading effect on the impedance and radiation performance of the TM_{03} -mode high-gain square patch antenna [C] // IEEE MTT-S International Microwave Biomedical Conference. Nanjing, China: IEEE, 2019: 1-4.
- [15] HE Yijing, LI Yue, SUN Wangyu, et al. Dual linearly polarized microstrip antenna using a slot-loaded TM_{50} mode [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(12): 2344-2348.
- [16] AHMED Z, AHMED M M. Sidelobe reduction and gain enhancement in higher order TM_{30} and TM_{70} mode rectangular patch antennas via partial notch loading [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2019, 13(12): 1955-1962.
- [17] JUYAL P, ADIBELLI S, SEHATBAKHS N, et al. A directive antenna based on conducting discs for detecting unintentional EM emissions at large distances [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(12): 6751-6761.
- [18] YANG K P, WONG K L. Dual-band circularly-polarized square microstrip antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001, 49(3): 377-382.
- [19] ZHANG Jindong, ZHU Lei, LIU Nengwu, et al. Dual-band and dual-circularly polarized single-layer microstrip array based on multiresonant modes [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(3): 1428-1433.
- [20] ZHANG Xiao, ZHU Lei. Dual-band high-gain differentially fed circular patch antenna working in TM_{11} and TM_{12} modes [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(6): 3160-3165.
- [21] HONG Kaidong, ZHANG Xiao, HUANG Guanlong, et al. A differential-fed rectangular microstrip patch antenna with dual-band high gain under operation of TM_{01} and TM_{03}

- modes [C] // International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Guangzhou, China: [s. n.], 2019: 1-3.
- [22] LIU Nengwu, ZHU Lei, CHOI W W. A differential-fed microstrip patch antenna with bandwidth enhancement under operation of TM_{10} and TM_{30} modes [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(4): 1607-1614.
- [23] NGUYEN-TRONG N, TA X S, IKRAM M, et al. A low-profile wideband tripolarized antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(3): 1946-1951.
- [24] LU Wenjun, LI Qing, WANG Shengguang, et al. Design approach to a novel dual-mode wideband circular sector patch antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(10): 4980-4990.
- [25] LIU Qianwen, ZHU Lei, WANG Jianpeng, et al. Wideband low-profile differential-fed patch antennas with an embedded SIW cavity under dual-mode resonance [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(6): 4235-4240.
- [26] KLIONOVSKI K, SHAMIM A. Physically connected stacked patch antenna design with 100% bandwidth [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 3208-3211.
- [27] HONG Kaidong, ZHANG Xiao, ZHU Lei, et al. A self-balanced wideband patch antenna fed with a U-resonator for stable radiation performance [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(4): 661-665.
- [28] SQUADRITO P, ZHANG Shuai, PEDERSEN G F. Wideband or dual-band low-profile circular patch antenna with high-gain and sidelobe suppression [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(6): 3166-3171.
- [29] LUO Yu, CHEN Zhining, MA Kaixue. A single-layer dual-polarized differentially-fed patch antenna with enhanced gain and bandwidth operating at dual compressed high-order modes using characteristic mode analysis [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(5): 4082-4087.
- [30] WEN Juan, XIE Danpeng, ZHU Lei. Bandwidth-enhanced high-gain microstrip patch antenna under TM_{30} and TM_{50} dual-mode resonances [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(10): 1976-1980.
- [31] ZHANG Xiao, WU Qionsen, ZHU Lei, et al. Resonator-fed wideband and high-gain patch antenna with enhanced selectivity and reduced cross-polarization [J]. IEEE Access, 2019, 7: 49918-49927.
- [32] MAO Chunxu, GAO S, WANG Yi. Broadband high-gain beam-scanning antenna array for millimeter-wave applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(9): 4864-4868.
- [33] MAO Chunxu, GAO S, WANG Yi, et al. Filtering antenna with two-octave harmonic suppression [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1361-1364.
- [34] YANG Wanchen, ZHANG Yingqi, CHE Wenquan, et al. A simple, compact filtering patch antenna based on mode analysis with wide out-of-band suppression [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(10): 6244-6253.
- [35] WU Qionsen, ZHANG Xiao, ZHU Lei. Co-design of a wideband circularly polarized filtering patch antenna with three minima in axial ratio response [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(10): 5022-5030.
- [36] XIANG B J, ZHENG S Y, PAN Y M, et al. Wideband circularly polarized dielectric resonator antenna with band-pass filtering and wide harmonics suppression response [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(4): 2096-2101.

【中文责编：英 子；英文责编：木 柯】