

引用格式:刘柄之,杨曙辉,陈迎潮.基于单馈点的多频段及宽带圆极化微带天线研究综述[J].中国传媒大学学报(自然科学版),2023,30(04):69-78.

文章编号:1673-4793(2023)04-0069-10

基于单馈点的多频段及宽带圆极化微带天线研究综述

刘柄之^{1,2},杨曙辉^{2*},陈迎潮³

(1.北京四达时代软件技术股份有限公司 北京100176; 2.中国传媒大学信息与通信工程学院,北京100024; 3.南卡罗来纳大学电气工程系,哥伦比亚 SC29208)

摘要:随着现代无线通信技术的快速发展,圆极化天线因其在减少多径干扰方面的优势而受到越来越多的关注,并已广泛应用于无线通信、雷达、卫星通信等系统中。由于需要传输的信号频率范围较广,因此要求使用多频段或宽带圆极化天线来实现信号的传输和接收。微带天线具有结构简单、成本低廉、加工方便、剖面低、设计灵活、易于实现多频段及宽带圆极化工作模式等优点,因而得到了广泛的应用和深入的研究。本文首先介绍了研究背景和圆极化天线的基本参数,然后论述了微带天线实现圆极化的基本技术,最后重点阐述了微带天线实现多频和宽带圆极化的几种改进技术。

关键词:圆极化;多频段;宽带;微带天线;圆极化技术

中图分类号:TN92;TN827 文献标识码:A

Review of multiband and wideband circularly polarized microstrip antennas based on single feed point

LIU Bingzhi^{1,2}, YANG Shuhui^{2*}, CHEN Yingchao³

(1. Beijing Startimes Software Technology Co. Ltd, Beijing 100176, China; 2. School of Information and Communication Engineering, Communication University of China, Beijing 100024, China; 3. Department of Electrical Engineering, University of South Carolina, Columbia SC29208, USA)

Abstract: With the rapid development of modern wireless communication technology, more and more attention has been paid to circularly polarized (CP) antenna because of its advantages in reducing multipath interference, and it has been widely used in wireless communication, radar, satellite communication and other systems. Because of the wide frequency range of signals to be transmitted, it is required to use multiband or wideband CP antennas to transmit and receive signals. Microstrip antenna has the advantages of simple structure, low cost, convenient processing, low profile, flexible design and easy to implement the multiband and wideband CP mode, so it has been widely used and in-depth researches. This paper first introduces the research background and the basic parameters of circular polarization antenna. Then we discuss the basic technology of microstrip antenna to achieve circular polarization, and finally expound several improved technologies of microstrip antenna to achieve multiband and wideband CP.

Keywords: CP; multiband; wideband; microstrip antenna; CP technique

作者简介(*为通讯作者):刘柄之(1997-),男,硕士,主要从事天线设计研究。Email:liubingzhi@cuc.edu.cn;杨曙辉(1971-),男,博士,教授,主要从事天线设计、电磁超材料及电磁兼容分析等研究。E-mail: yangshuhui@cuc.edu.cn;陈迎潮(1967-),男,博士,教授,主要从事计算电磁学、信号完整性及电磁超材料等研究。Email:chenyin@cec.sc.edu

1 引言

移动通信是现代通信技术的重要组成部分。随着移动通信的发展,人们对通信质量和速度的要求也越来越高^[1-3]。传统的单频天线无法满足现代天线的需求,主要有以下几个原因:

(1)通信频段的增多。随着无线通信技术的不断发展,各种应用领域(例如无人机、智能家居、智能交通等)的通信手段也越来越丰富,传统的单频段天线只能在特定频段内工作,无法满足其多频段通信的需求。

(2)空间资源的有限性。在现代城市中,空间资源非常有限。为了满足多种通信标准的需求,需要在有限的空间内安装多个天线。这不仅会占用大量的空间,还会增加建设和维护的成本。

(3)电磁兼容性。在现代电子设备中,不同的设备会产生不同的电磁干扰。传统的单频段天线无法满足电磁兼容性的要求。

多频段天线是指能够在多个频段内工作的天线。它可以同时支持多种通信标准,从而提高通信质量和速度^[4-6],如GSM、CDMA、LTE等。

宽带天线是一种能够在较宽的频带内工作的天线。在研究过程中,人们发现传统的天线类型往往只能在狭窄的频带内工作,而在其他频段内的性能表现不佳。因此,研究人员开始探索新的天线结构,以实现更广泛的频带覆盖和更好的性能表现。在此背景下,出现了一系列新型宽带天线,如螺旋天线、宽带贴片天线、宽带微带天线等。这些新的天线设计都能够在较宽的频带内工作,并且在不同频段内的性能表现都比传统的天线设计方法更好。

圆极化天线是一种特殊的天线,它能够同时接收任意极化方向的电磁波,并且它所辐射的电磁波可以被任意极化方式的天线接受。相较于传统的线极化天线,圆极化天线可以消除多径效应的影响,减少传输信号的衰减以及提高抗干扰能力。

微带天线就是利用光刻腐蚀方法在介质基板两面形成特定金属图案的一种天线。它具有体积小、重量轻、制造简单等优点,可以满足通信设备小型化和轻量化的需求,因此在圆极化技术的应用方面具有巨大的潜力。

随着通信技术的不断发展和应用需求的不断增加,多频段和宽带圆极化微带天线的研究也得到了越来越广泛的关注,被广泛应用于无线通信、雷达、卫星

通信、航空航天等领域,成为现代通信技术的重要组成部分。此类研究不仅可以降低天线成本和结构的复杂度,还能在有限的空间内支持多种通信标准,提高通信质量和速度,减少电磁干扰的影响,以实现更广泛的频带覆盖和更好的性能表现,为人们的生活和工作带来更多的便利^[7-10]。

2 圆极化天线基本参数

(1)方向图、增益和效率

天线方向图是描述天线辐射方向性的图形。它是描述天线辐射特性的重要参数之一,也是天线设计和应用中的关键因素。在实际应用中,天线方向图的选择和优化对于天线的性能和应用效果具有重要的影响^[11]。

为了方便,工程上常采用二维图形来描述^[12],通常用极坐标系表示,其中径向表示辐射强度,角度表示辐射方向。天线方向图可以用来描述天线在不同方向上的辐射强度和辐射方向,以及天线的主瓣方向、副瓣方向、波束宽度等参数。为了使各种天线方向图的比较和绘制方便,一般取方向性函数的最大值为1,即归一化方向图。由以下公式表示:

$$F(\theta, \varphi) = \frac{|E(\theta, \varphi)|}{|E_{\max}|} \quad (1)$$

其中, $|E(\theta, \varphi)|$ 表示的是任意位置的场强幅值, $|E_{\max}|$ 表示最大的场强幅值。

天线增益是指天线在输入功率相等的条件下,实际天线与理想的辐射单元在空间同一点处所产生的信号的功率密度之比^[13]。天线增益通常用分贝表示,即dBd或dBi。在实际应用中,通常使用dBi作为参考值。天线的增益是由天线安装在系统中位置、类型、输入功率、天线方向性和损耗等因素共同决定的。摆放天线的高度、天线的宽高比、天线的辐射状况和支撑结构等都会影响天线的增益。

天线的增益可以由以下公式计算(P_{in} 为天线的输入功率):

$$G = \frac{4\pi}{P_{in}} \quad (2)$$

天线效率是一个衡量天线性能的重要参数。它是指天线将电能输送到传输介质的能力,也就是天线将输入的功率转换为有效的辐射功率的能力。当天线受到输入信号作用时,它会将电能转化为电磁波辐射出去。然而,由于天线自身的电阻和电感阻碍了电磁波能量的输出,因此只有一部分的输入功率能够被

有效地辐射出去。天线的效率等于输出功率与输入功率之比,它的值通常在0和1之间,并根据天线的设计和制造过程的性能而变化。一个高效的天线可以提供更好的性能,具有更远的覆盖范围和更强的信号质量。因此,天线效率是在选择和设计天线时需要考虑的重要因素之一。

如果分别用 P_{in} 和 P_{rad} 表示天线的输入功率和辐射功率,则天线效率为:

$$\eta_A = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \quad (3)$$

(2) 天线带宽

天线的频带宽度,简称为天线带宽,它的定义为:天线的工作频率范围,即可以接收或发射电磁波的频率范围,用 f_1 至 f_2 表示。而此范围的中心点被称为中心频率,用 f_0 表示。天线带宽主要有三种表示方法:相对带宽、绝对带宽和比值带宽。

相对带宽是指天线工作频率范围与其中心频率之比,通常用百分比表示:

$$\Delta f = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \times 100\% \quad (4)$$

比如,一个天线中心频率为5 GHz,其工作频率范围为4.5 GHz-5.5 GHz,其相对带宽为10%。相对带宽越大,天线可以接收或发射的频率范围也就越宽,因此相对带宽是衡量天线频带能力的重要参数。一些应用中,如通信系统、雷达、无线电频谱监测等,要求天线具有广泛的频带宽度和高的频率选择性,这时相对带宽显得尤为重要。

绝对带宽是指天线工作的最高频率和最低频率的差,通常用赫兹(Hz)或吉赫兹(GHz)表示:

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (5)$$

绝对带宽越大,天线能够处理的频率范围也就越宽,但是绝对带宽不能完全反映天线的频带能力,因为某些应用中要求天线工作频带范围不一定要覆盖整个带宽。例如,GPS天线只需要工作在计算导航需要的频段,因此对于GPS天线而言,绝对带宽并不是关键的参数。而比值带宽是指上、下限频率之比,即 $f_2:f_1$ 。

通常来说,相对带宽被经常使用,而比值带宽主要用于描述超带宽天线的带宽。

(3) 极化与轴比

天线极化是指天线辐射电磁波的电场矢量在空间中的方向,即时变电场矢量端点运动轨迹的形状、取向和旋转方向。天线极化的方式有三种:线极化、

椭圆极化和圆极化。线极化包括水平极化和垂直极化,分别指电场矢量沿着水平或垂直方向振动。圆极化是指电场矢量在空间中沿着圆周方向旋转,而椭圆极化则是指电场矢量在空间中沿着椭圆方向旋转。根据其旋转方向的不同,椭圆极化和圆极化又包含左旋极化和右旋极化两种方式。

在实际工程中,严格意义上的圆极化波是很难实现的,于是就有了一个衡量天线圆极化的参数,即轴比AR(Axial Ratio),单位采用dB。它是指椭圆的长轴a与短轴b之比,即:

$$AR = 20 \lg \frac{a}{b} \quad (6)$$

从轴比的定义就可以看出,当 $AR = 0$ dB时,此时是圆极化,当 $AR = \infty$ 时为线极化。一般工程上的圆极化要求是 $AR \leq 3$ dB。

3 微带天线圆极化技术

天线实现圆极化的原理就是:分别产生两个线极化电场分量,并且两个分量的振幅相等,相位相差 90° 。微带天线实现圆极化的方式主要有三种^[14]:单点馈电法、多点馈电法和多元法。

单点馈电法只有一个馈电点,它主要采用微扰动技术。通过对天线引入微扰单元,改变天线的电场平衡,并使天线表面电流相位发生改变,使其相差 90° ,从而满足圆极化条件。具体的实现操作是对天线的辐射贴片添加枝节、进行切角、开槽、引入寄生贴片等,如图1所示。此种方法无需外加的相移网络和功率分配器,结构简单,成本低,适合天线小型化。缺点是带宽窄,极化性能较差。

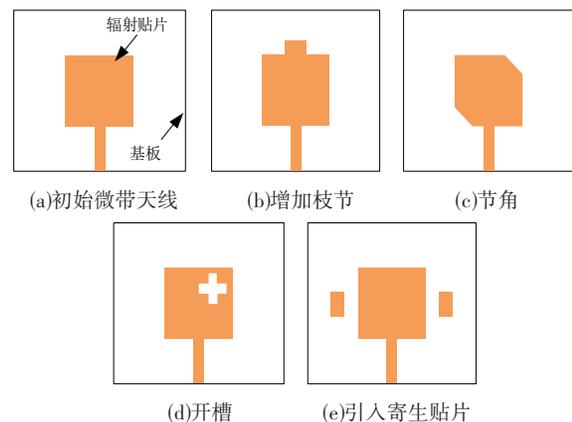


图1 单点馈电法微扰动技术示意图

多点馈电法是使用2个及以上的馈电点,一般利用复杂的馈电网络(如相移网络和功率分配器)来使

两个模式的振幅相等、相位差 90° ,从而达到圆极化条件。此方法可提高阻抗带宽及圆极化带宽,抑制交叉极化,提高轴比。缺点是馈电网络较复杂,成本较高,尺寸较大。

多元法则是多个线极化辐射单元按一定位置排列来实现圆极化辐射,它具备多馈法的优点,而馈电网络较为简化,增益高。缺点是结构复杂,成本较高,尺寸大。

本文主要介绍了基于单点馈电法的改进技术来实现微带天线多频段及宽带圆极化的研究进展。

4 多频段及宽带圆极化微带天线实现方式

4.1 宽缝隙结构

宽缝隙结构的圆极化天线本身就具有宽带的特性,这种天线能够在多个频段或宽频段范围内实现阻抗匹配和圆极化性能,因此成为近年来研究者们设计圆极化天线所采用的主要方式。宽缝隙结构天线的馈电形式往往是倒“F”形、倒“L”形,缺陷地结构以正方形、矩形和多边形缝隙为主。通过改变馈线和缺陷地缝隙的结构形状,可以扩宽天线的阻抗带宽和轴比带宽。1999年,JI Park教授团队首次创造性地使用了缺陷地结构,此后,缺陷地结构开始受到众多关注,逐渐成为了微波、毫米波等天线设计领域内的热门研究课题。缺陷地结构的原理主要是对地面进行开槽形成缝隙结构,以此改变缺陷地的等效电感和电容,使得其拥有慢波和带阻特性。因此,缺陷地结构可以应用在抑制天线的高次谐波、提高天线增益、带宽和Q值等方面^[15]。

Sirous Bahrami等人提出了一种可调谐的超宽带圆极化宽缝天线^[16],如图2所示。它被打印在32 mil厚的Rogers 4003C衬底的两面,上层是心形槽,底层是连接到 $50\ \Omega$ 微带线的“L”形馈线并通过馈电网络连接SMA连接器。通过调整馈线的尺寸可以获得较宽的重叠带宽,并用合适相位的源来激励狭槽产生圆极化。为了优化阻抗匹配带宽和圆极化辐射特性,在

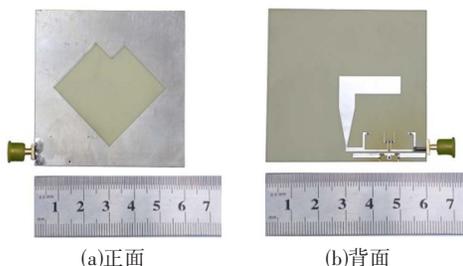


图2 文献[16]中的天线实物图

方形槽的顶部角处进行扰动。天线的阻抗带宽为92.3% (3.5-9.5 GHz),而在宽带模式下,它的轴比带宽为88.3% (3.1-8 GHz)。

在文献[17]中提出了一种微带馈电的简单宽缝隙天线,可实现三段宽频带圆极化辐射,如图3所示。它包括一个“L”形辐射贴片和一个地面宽缝结构。地面相对的角落有两个矩形条,在下部的右侧矩形条上开一个矩形狭缝,主要用于拓宽上频段的轴比带宽。该天线在上频段和下频段辐射右旋圆极化波,在中频段辐射左旋圆极化波。如图4所示,测量的阻抗带宽分别为44.0% (2.34-3.66 GHz)和70.9% (4.55-9.55 GHz)。三波段实测的3 dB轴比带宽分别为35.9% (2.40-3.45 GHz)、44.0% (4.65-7.27 GHz)和6.3% (8.13-8.66 GHz)。在工作范围内测量的峰值增益分别为4.2、3.7和3.5 dBi。

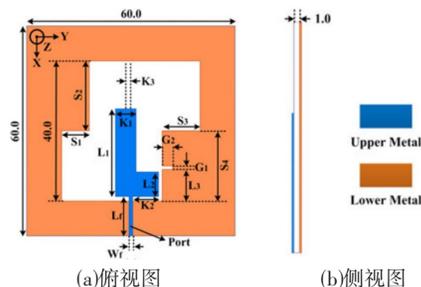


图3 文献[17]中的天线结构示意图

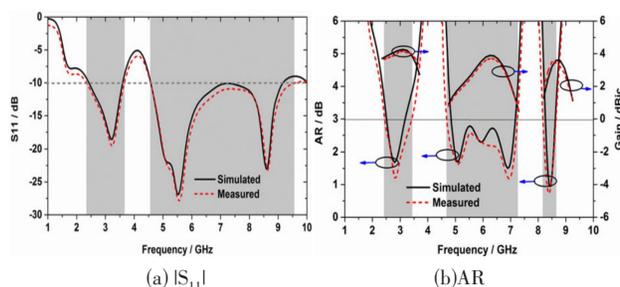
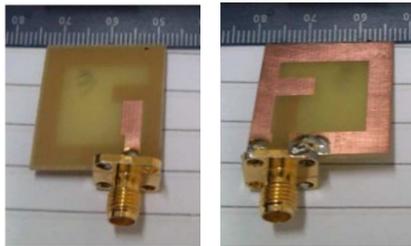


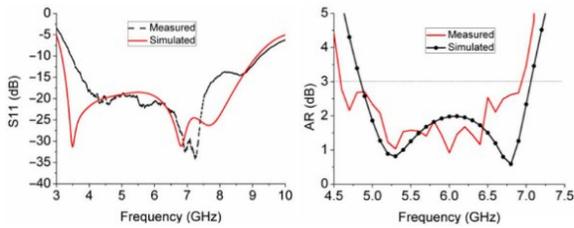
图4 文献[17]中的天线仿真与测量数据

Mubarak Sani Ellis等人提出了一种结构简单、紧凑的新型圆极化缝隙天线^[18],如图5所示。该天线的地面采用了蚀刻出矩形槽的宽缝隙结构,地面下方被另一个较窄的矩形槽截断,以此破坏电流的对称性与连续性。在缺陷地结构的一侧还加载了水平方向的枝节,它的作用是加强水平电流,缩小与垂直电流的幅值差,使天线更容易满足圆极化条件。此外,通过在馈线顶部添加短枝节,加强了与地面的耦合,轴比带宽可以显著提高。该天线结构简单,基板是FR-4材料,成本低,易于加工。如图6所示,测量结果显示,天线 $|S_{11}| < -10\ \text{dB}$ 的阻抗带宽为90.2%(3.5-9.25

GHz), AR 大于 3 dB 的轴比带宽为 40%(4.6-6.9 GHz)。并且在频段内实现了 4.5 dBi 的峰值增益。它适用于 C 波段的无线通信,包括 WLAN(5.2 GHz、5.8 GHz)和 WiMAX(5.5 GHz)。



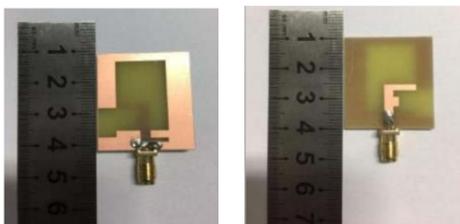
(a)正面 (b)背面
图5 文献[18]中的天线实物图



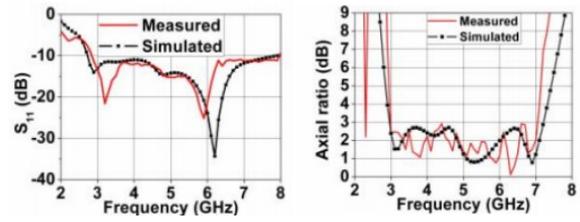
(a) $|S_{11}|$ (b) AR
图6 文献[18]中的天线仿真与测量数据

设计一款轴比带宽大于 80%, 并且结构紧凑的单馈点圆极化微带天线是一项非常具有挑战性的任务。部分天线虽然圆极化带宽大于 80%, 但它们的尺寸较大^[19]或呈现较为复杂的结构^[20]。

Kwame Oteng Gyasi 等人提出了一款紧凑、简单的超宽带圆极化缝隙天线^[21]。如图 7 所示。天线尺寸是 30 mm × 30 mm × 1.6 mm, 它采用倒“F”形微带馈线, 接地层中有两个相连的矩形缝隙和一个“L”形缝隙, 多缝隙结构有利于延展天线的表面电流路径, 降低天线工作频率, 进而拓宽阻抗带宽。倒“F”形的微带馈线有利于调节水平方向和垂直方向的电流, 因此可以在宽频带内产生两个具有相同振幅和 90° 相位差的正交模式。该天线在不使用任何无源元件或通孔的情况下实现了大于 80% 的圆极化带宽, 同时也保持了天线结构的紧凑性。如图 8 所示, 测量结果显示,



(a)正面 (b)背面
图7 文献[21]中的天线实物图



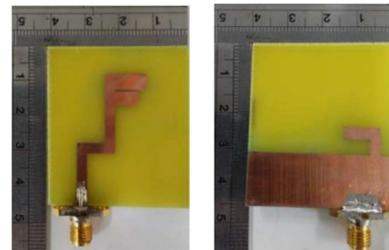
(a) $|S_{11}|$ (b) AR
图8 文献[21]中的天线仿真与测量数据

天线的阻抗带宽为 92.6% (2.9-7.9 GHz), 轴比带宽为 83.5% (3-7.3 GHz)。

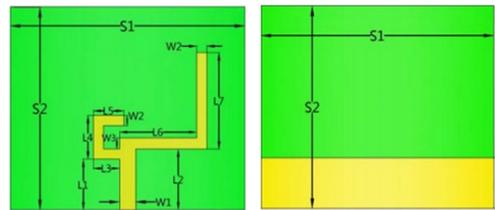
4.2 微带单极子结构

近些年来, 利用单极子结构来实现天线圆极化逐渐成为研究者们热衷的课题。单极子天线不仅结构紧凑, 易于加工, 并且同样具有宽阻抗带宽的特性, 通过对辐射贴片和接地面引入微扰元素来扰动天线表面电流分布并且改变天线的阻抗匹配, 并利用它们之间的耦合来实现更好的圆极化特性。

通过在辐射贴片上增加新的折叠枝节是实现多频圆极化特性最直接的方法^[22-23], 如图 9、图 10 所示。



(a)正面 (b)背面
图9 文献[22]中的天线实物图

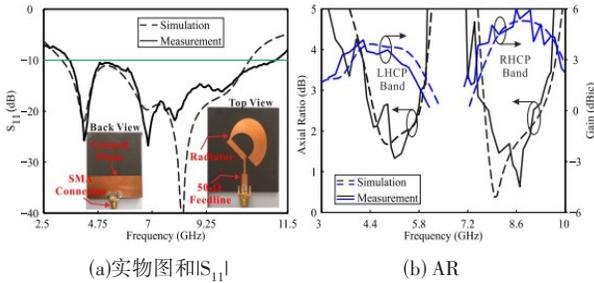


(a)正面 (b)背面
图10 文献[23]中的天线结构示意图

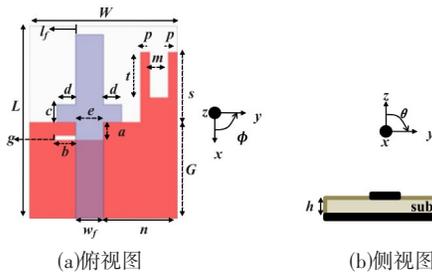
然而, Amir Altaf 等人利用单枝节的“D”形辐射贴片很好地实现了两个频段的圆极化, 高频带和低频带分别辐射右旋圆极化和左旋圆极化波^[24], 如图 11 所示。

文献[25]介绍了一种结构简单、紧凑的新型宽带圆极化单极子微带天线, 如图 12 所示。宽带圆极化是通过接地面一侧的拓展延伸枝节来实现的, 而十字形单极子结构和接地面中众多槽的存在确保了范围广泛的阻抗带宽。此外, 在不修改结构参数的情况

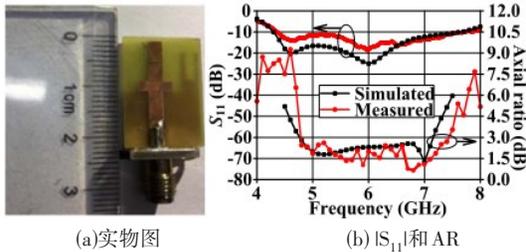
下,只需在天线背面放置一个金属反射面,就可以提高辐射性能,实现单向辐射。如图13、14所示,测量结果表明,天线的3 dB轴比带宽约为42.6% (2.6 GHz, 4.8-7.4 GHz),完全覆盖了55.5% (3.35 GHz, 4.36-7.71 GHz)的-10 dB阻抗带宽。



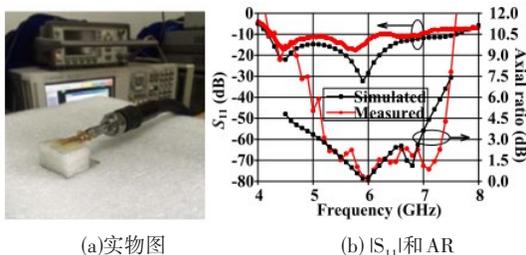
(a)实物图和 $|S_{11}|$ (b) AR
图11 文献[24]中的天线实物图和数据



(a)俯视图 (b)侧视图
图12 文献[25]中的天线结构示意图



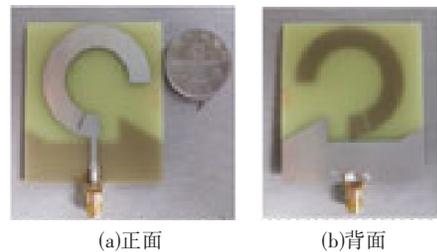
(a)实物图 (b) $|S_{11}|$ 和AR
图13 文献[25]中的天线实物图和数据



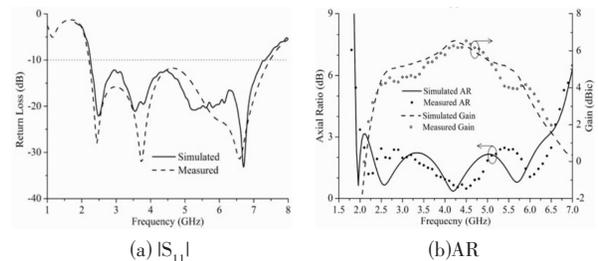
(a)实物图 (b) $|S_{11}|$ 和AR
图14 文献[25]中带金属板的天线实物图和数据

如图15所示,Hongyan Tang等人提出了一种具有宽带圆极化“问号”形单极子天线^[26]。通常来说,单极子天线辐射单一的水平方向或垂直方向的线极化波。通过在“C”字形贴片左下方刻蚀一条矩形狭缝,改变了电流流向。原本的电流只有一条倾斜方向的路径,开缝之后,与原电流垂直的方向又多了两条电流路径,分布在缝隙的两侧。这样就可以在更多的频段同时产生水

平和垂直两个方向的线极化波,从而拓展其轴比带宽,提高了圆极化性能。另外,由于优化前的矩形接地面高度对称,导致左右两个方向的电流相互抵消,电流矢量和为零,与辐射贴片的耦合效果不佳,同时也无法满足产生两个正交电流的圆极化条件。通过对地面增加两个三角形的枝节,使其结构变得不对称,地面的表面电流被扰动,与辐射贴片的耦合得到了加强。如图16所示,天线的阻抗带宽为106.3%(2.25-7.35 GHz),小于3 dB的轴比带宽为104.7%(2.05 - 6.55 GHz)。由于其紧凑简单的平面结构和超宽带的圆极化特性,该天线适用于各种无线通信系统。



(a)正面 (b)背面
图15 文献[26]中的天线实物图



(a) $|S_{11}|$ (b) AR
图16 文献[26]中的天线仿真与测量数据

4.3 引入寄生贴片

传统的微带天线常常采用单一结构的辐射贴片来实现圆极化,虽然它结构简单、紧凑,但是其带宽往往很窄。通过引入寄生贴片可以拓宽天线的带宽,寄生贴片的加入可以改变天线的电感、电容和电阻等参数,从而影响天线的阻抗匹配、频率响应和辐射特性。通过调节寄生贴片的尺寸、形状和位置等参数,可以实现对天线的增益、方向性、圆极化等性能的优化。对辐射主体进行馈电时,寄生贴片通过耦合辐射主体上的能量,产生新的在主模频率附近的谐振模式,从而达到拓展带宽的目的。

在文献[27]中,提出了一种简单、紧凑的多频带圆极化方形槽天线,如图17所示,该天线引入金属带和裂环结构(Split-Ring Resonator, SRR)作为寄生贴片。天线采用微带馈电方式,通过与SRR和金属带相互耦

合实现多波段辐射。SRR影响的谐振频率为1.83 GHz,而金属带和方槽天线影响的谐振频率为2.5和3.1 GHz。当SRR和金属带的谐振模式与方槽的基本模式相结合时,天线可以在谐振频率范围内产生圆极化波。所提出的天线可以通过倾斜的金属带和SRR对不同波段进行独立调谐。如图18所示,该天线的谐振频率为1.83、2.5和3.1 GHz,阻抗带宽分别为21.4%、12.8%和4.5%,轴比带宽分别为4.37%、11.9%和3.6%,增益分别为2.7、3.2和3.5 dBi。

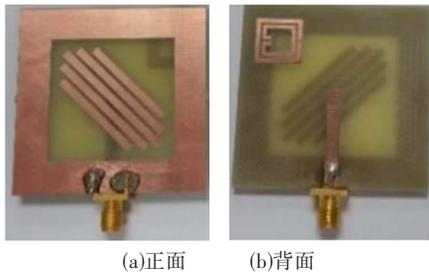


图17 文献[27]中的天线实物图

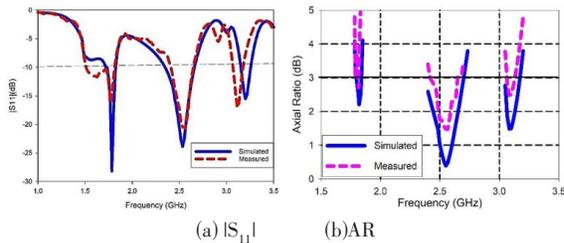
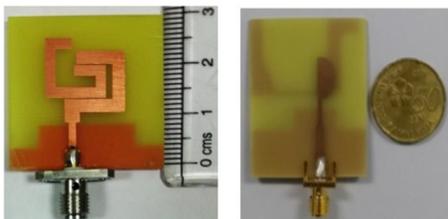


图18 文献[27]中的天线仿真与测量数据

如图19(a)所示,Manas Midya等人提出了一种加载寄生贴片的微带馈电单极子天线,其中超过87%的阻抗带宽与轴比带宽重叠,实现了很好的圆极化辐射^[28]。该天线设计简单易于加工、成本低、结构紧凑。为了确保简单性和紧凑性,根据单馈电磁耦合技术在激发圆极化模式方面的优越性,在反“C”形辐射贴片左侧加载“G”形寄生贴片,利用寄生贴片与辐射贴片之间的耦合形成正交简并模。通过对地地面两边的开槽操作,破坏天线接地面的对称性,天线的轴比带宽得到了极大的扩展。如图20所示,测量结果表明,天线可工作在3.92-7.52 GHz(62.94%)频段,且它的轴



(a)文献[28]中的天线 (b)文献[29]中的天线

图19 天线实物图

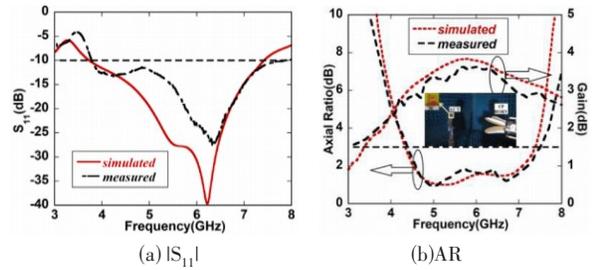


图20 文献[28]中的天线仿真与测量数据

比带宽为53.92% (4.28-7.44 GHz)。该天线能够为WLAN (5.150-5.350 GHz、5.725-5.825 GHz)、Wi MAX (5.5 GHz)和ISM频段(5.8 GHz)提供服务。

Hussein Alsariera等人提出了一种结构简单、体积小,具有宽阻抗带宽与轴比带宽的“P”形圆极化单极子天线^[29],见图19(b)。该天线通过将50 Ω矩形馈线与“P”形贴片连接,可实现宽阻抗带宽。通过在背面添加具有四个臂的不对称寄生条实现了圆极化辐射,同时进一步拓宽了阻抗带宽与轴比带宽。两个三角形直接连接寄生条增加了电流路径,在接地面的处理上同样是增加了两个矩形槽,来破坏接地面的对称性。如图21所示,其阻抗带宽为118.5% (1.6-6.25 GHz),轴比带宽为104.4% (1.9-6.05 GHz)。所提出的天线设计可以很好的适用于各种无线通信系统。

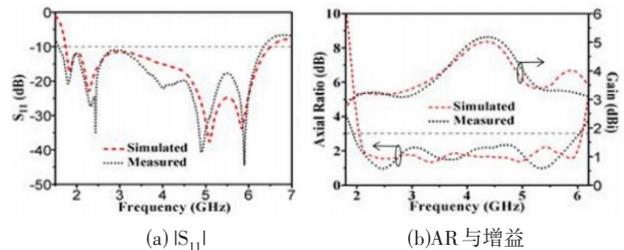
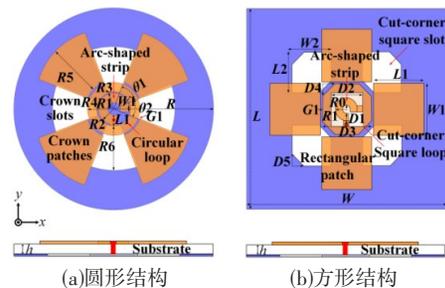


图21 文献[29]中的天线仿真与测量数据

在文献[30]中提出了两种新型宽带圆极化开槽微带天线(分为圆形结构和方形结构),如图22所示。天线由四个作为寄生元件的贴片、一个圆形/方形环缺陷地和四个蚀刻在圆形/方形缺陷地上的槽组成。首先,四个槽和环耦合激发一种圆极化模式,而后引入寄生贴片



(a)圆形结构 (b)方形结构

图22 文献[30]中的天线结构示意图

又增加了另一种圆极化模式。这些圆极化模式相结合提高了天线的轴比带宽。如图23所示,天线最终选定为圆形结构,具有20.6%的轴比带宽(5.20-6.40, 5.8GHz)和25.8%的阻抗带宽(4.92 -6.38, 5.65 GHz)。如图24所示,可用于无线局域网(5.725-5.85 GHz)、ITS (5.8 GHz)和WIFI(5.85-5.925 GHz)频段。

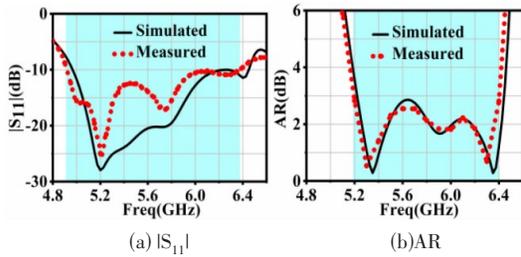


图23 文献[30]中的天线圆形结构仿真与测量数据

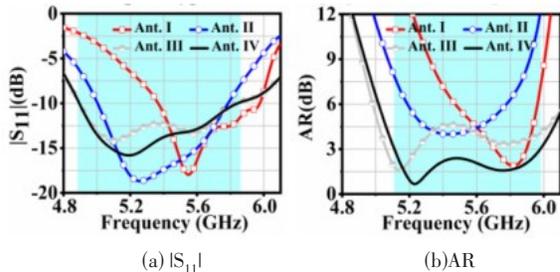


图24 文献[30]中的天线方形结构仿真与测量数据

4.4 引入有源或无源器件

如图25所示,Rui Xu等人提出了一种基于“Γ”形辐射贴片、圆形缺陷地并且加载电阻的缝隙天线^[20]。与之前的缝隙圆极化天线^[31-33]相比,该天线具有更宽的阻抗带宽、更宽的轴比带宽、相对较小的尺寸和最低的天线轮廓。该天线利用在圆形地面上切割的三个椭圆缝隙来产生圆极化特性。其独特的创新之处是通过添加片式电阻来接收电流和减少反射,可显著提高圆极化带宽。在天线底部增加反射板可成为具有单向辐射的超宽带圆极化缝隙天线。如图26所示,测量结果表明天线的阻抗带宽为106.1% (1.01-3.29 GHz),轴比带宽为89.7% (1.26 - 3.31 GHz)。

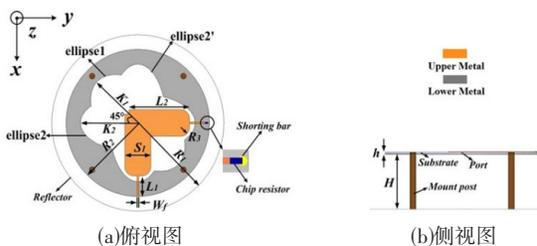


图25 文献[20]中的天线结构示意图

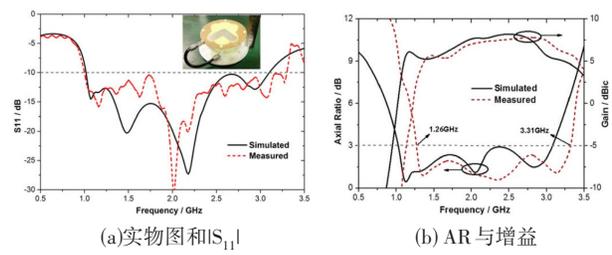


图26 文献[20]中的天线实物图和数据

如图27所示,Ankit Bhattacharjee等人提出了一款宽带极化可重构圆极化微带天线^[34]。由一个带有间隙的金属环和一个通过添加枝节、开槽而改进的地平面构成。该天线引入两个二极管来控制极化状态,通过控制二极管的偏置状态,可以获得左旋圆极化、右旋圆极化和线性极化。如图28所示,测试结果表明,天线在加载偏置电路后,可以在所有工作状态下获得超过50%的有效带宽。

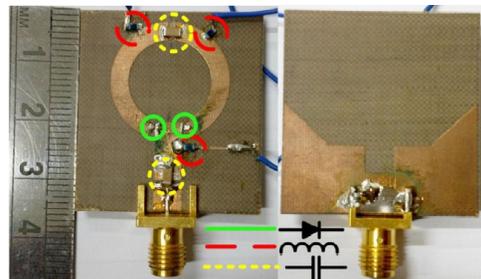


图27 文献[34]中的天线实物图

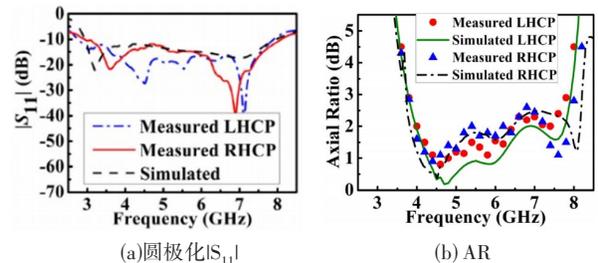
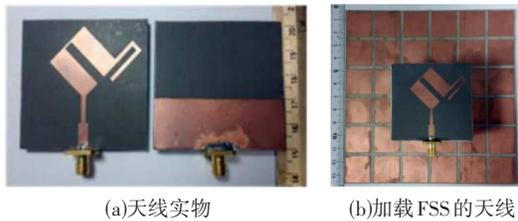
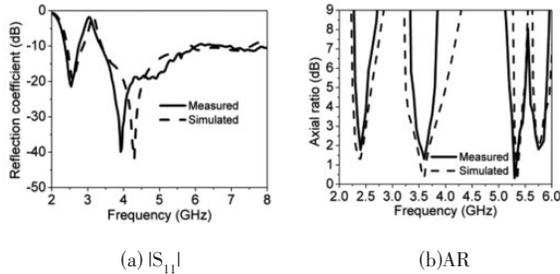


图28 文献[34]中的天线仿真与测量数据

文献[35]提出了一种适用于2.4/5.3/5.8 GHz WLAN和3.5 GHz WiMAX应用的四频段圆极化天线,如图29所示。在2.4/3.5/5.8 GHz频段工作的三种圆极化模式主要通过由一个倒“U”形辐射贴片、额外的“Γ”形与“L”形枝节和矩形缺陷地组成的微带天线实现,三种贴片都围绕水平轴旋转45度。通过在天线下放置一个简单的方形金属贴片频率选择面(FSS),将5.3 GHz的线极化信号转换为圆极化信号,形成了四波段圆极化天线。如图30所示,测得天线的阻抗带宽为380 MHz (2.37-2.75 GHz)和4.6 GHz (3.4-8 GHz)。天线的轴比带宽分别为5.4% (2.35-2.48 GHz)、8.3% (3.45-3.75 GHz)、3.7% (5.25-5.45 GHz)和2.9% (5.7-5.87 GHz)。

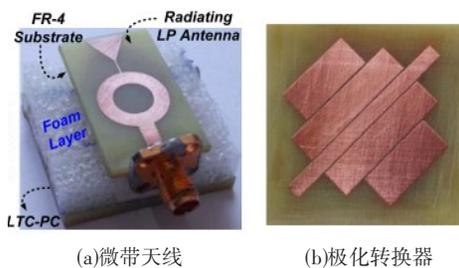


(a)天线实物 (b)加载FSS的天线
图29 文献[35]中的天线实物图

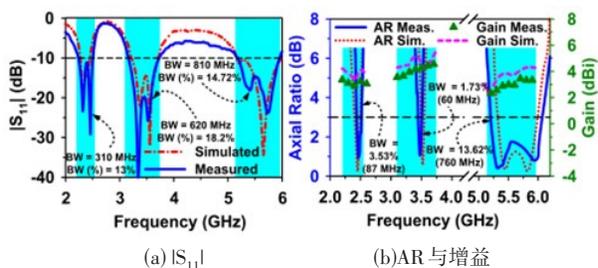


(a) $|S_{11}|$ (b) AR
图30 文献[35]中的天线仿真与测量数据

Mohammad Ameen 等人提出了一种具有各向异性的线极化到圆极化转换器(Linear-to-Circular Polarization Converter, LTC-PC)的紧凑型微带天线,实现了三频段圆极化^[36]。天线实物图如图31所示,该天线将紧凑的三波段线极化天线与基于三波段的LTC-PC相结合,实现了三频段圆极化辐射。到目前为止,只有少数基于LTC-PC的单频天线被报道。与现有的单频、双频和三频段圆极化天线相比,该天线在设计中不使用任何通孔工艺,没有设计复杂性,拓展了阻抗带宽和轴比带宽。如图32所示,三频段中心频率分别为2.38 GHz、3.44 GHz和5.5 GHz。分别提供13.0%、18.2%和14.7%的阻抗带宽。该天线的轴比带宽分别为3.53%、1.73%和13.62%。



(a)微带天线 (b)极化转换器
图31 文献[36]中的天线实物图



(a) $|S_{11}|$ (b) AR与增益
图32 文献[36]中的天线仿真与测量数据

5 结论

目前,基于单点馈电法的微带天线圆极化改进技术发展较为迅速。每种方法在拓宽天线工作带宽、提高圆极化性能方面都有显著效果。例如,宽缝结构本身就具有宽带的特性,通过改变馈线和缺陷地缝隙的结构形状,可以扩宽天线圆极化带宽;微带单极子结构的天线不仅结构紧凑,易于加工,并且同样具有宽阻抗带宽的特性,通过对辐射贴片和接地面引入微扰元素来扰动天线表面电流分布,从而形成圆极化;通过引入寄生贴片可以改变天线的电感、电容和辐射电阻等参数,拓宽天线的带宽,对辐射主体进行馈电时,寄生贴片通过耦合辐射主体上的能量,产生新谐振模式,从而达到展宽圆极化带宽的目的;而加载其他器件来提高圆极化性能的方式是如今的研究热点,它既利于天线实现多种谐振和极化模式,又可以使天线更容易集成于系统中,拓宽天线的实际应用范围。随着无线通信系统的不断完善和应用需求的持续增加,多频段及宽带圆极化微带天线的研究也会得到越来越广泛的关注,因此,在未来的研究中,微带天线的圆极化改进技术会有更加广泛的应用前景。

参考文献(References):

- [1] 李霜. 宽带圆极化印刷天线研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2019.
- [2] Samsuzzaman M, Islam M T, Singh M J. A compact printed monopole antenna with wideband circular polarization[J]. IEEE Access, 2018, 6: 54713-54725.
- [3] Panahi A, Bao X L, Ruvio G, et al. A printed triangular monopole with wideband circular polarization[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(1): 415-418.
- [4] 董腾. 宽带圆极化微带天线的设计与实现[D]. 重庆:重庆邮电大学, 2018.
- [5] 丘福深. 宽频带/双频带小型化天线的设计与研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学, 2020.
- [6] 李振亚, 竺小松, 张建华, 刘汉. 新型超宽带圆极化印刷天线[J]. 系统工程与电子技术, 2019, (01): 9-13.
- [7] Cai Y M, Li K, Yin Y Z, et al. Broadband circularly polarized printed antenna with branched microstrip feed[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 674-677.
- [8] 王彬. 圆极化天线的研究与设计[D]. 广州:华南理工大学, 2018.
- [9] 赵志鹏. 寄生加载的宽带圆极化天线研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2020.

- [10] Ding K, Gao C, Wu Y, et al. A broadband circularly polarized printed monopole antenna with parasitic strips [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16:2509-2512.
- [11] 王玉峰,常雷.圆极化天线技术[M].北京:国防工业出版社,2017:1-17.
- [12] 李明洋,刘敏,杨放.HFSS天线设计[M].北京:电子工业出版社,2011:2-8.
- [13] 李玲玲.宽带多频圆极化微带天线的研究与设计[D].成都:西南交通大学,2021.
- [14] 杨东.宽带及多频带圆极化天线的研究[D].西安:西安电子科技大学,2018.
- [15] 吕明明.多频段微带天线的研究与设计[D].青岛:山东科技大学,2019.
- [16] Bahrami S, Moloudian G, Song H J, et al. Reconfigurable UWB circularly polarized slot antenna with three modes of operation and continuous tuning rang [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(9):8542-8547.
- [17] Xu R, Li J Y, Qi Y X, et al. A design of triple-wideband triple-sense circularly polarized square slot antenna [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16:1763-1766.
- [18] Ellis M S, Zhao Z Q, Wu J N, et al. A novel simple and compact microstrip-fed circularly polarized wide slot antenna with wide axial ratio bandwidth for C-band applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(4):1552-1555.
- [19] Xu R, Li J Y, Liu J. A design of broadband circularly polarized C-shaped slot antenna with sword-shaped radiator and its array for L/S-band applications [J]. *IEEE Access*, 2018, 6:5891-5896.
- [20] Xu R, Li J Y, Wei K, et al. A broadband slot antenna with unidirectional circularly polarized radiation patterns [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16:317-320.
- [21] Gyasi K O, Wen G, Inserra D, et al. A compact broadband circularly polarized slot antenna with two linked rectangular slots and an inverted-F feed line [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(12):7374-7377.
- [22] Lu J H, Liou C W. Planar dual-band circular polarization monopole antenna for wireless local area networks [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14:478-481.
- [23] Tan M T, Wang B Z. A dual-band circularly polarized planar monopole antenna for WLAN/Wi-Fi applications [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15(1):670-673.
- [24] Altaf A, Seo M. A tilted-D-shaped monopole antenna with wide dual-band dual-sense circular polarization [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(12):2464-2468.
- [25] Gyasi K O, Wen G, Inserra D, et al. A compact broadband cross-shaped circularly polarized planar monopole antenna with a ground plane extension [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(2):335-338.
- [26] Tang H, Wang K, Wu R, et al. A novel broadband circularly polarized monopole antenna based on C-shaped radiator [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16:964-967.
- [27] Maria P P, Krishnamoorthy K, Mohammad S S. A tri-band circularly polarized strip and SRR-loaded slot antenna [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(10):5569-5573.
- [28] Midya M, Bhattacharjee S, Mitra M. Broadband circularly polarized planar monopole antenna with G-shaped parasitic strip [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(4):581-585.
- [29] Alsariera H, Zakaria Z, Isa A A M. A broadband P-shaped circularly polarized monopole antenna with a single parasitic strip [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(10):2194-2198.
- [30] Wang L, Zhu Z, En Y. Performance enhancement of broadband circularly polarized slot - microstrip antenna using parasitic elements [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(12):2255-2259.
- [31] Nosrati M, Tavassolian N. A Y-slot wideband circularly polarized antenna for non-contact health monitoring applications [C]//*IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, 2016:1817-1818.
- [32] Wei J, Jiang X, Peng L. Ultrawideband and high-gain circularly polarized antenna with double-Y-shape slot [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16:1508-1511.
- [33] Mousavi P, Miners B, Basir O. Wideband L-shaped circular polarized monopole slot antenna [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2010, 9:822-825.
- [34] Bhattacharjee A, Dwari S, Mandal M K. Polarization-reconfigurable compact monopole antenna with wide effective bandwidth [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(5):1041-1045.
- [35] Hoang T V, Le T T, Li Q Y, et al. Quad-band circularly polarized antenna for 2.4/5.3/5.8-GHz WLAN and 3.5-GHz WiMAX applications [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15:1032-1035.
- [36] Ameen M, Thummaluru S R, Chaudhary R K. A compact multilayer triple-band circularly polarized antenna using anisotropic polarization converter [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(2):145-149.