

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2023.01.014

一种低剖面频率可重构天线的设计与研究

马建国, 王仲根, 穆伟东

(安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:针对目前频率可重构天线存在的尺寸较大、频率可调范围不足、带宽窄且难以同时覆盖 5G/WiMAX/WLAN 等常用频段的问题,提出一种结构新颖的频率可重构天线,共有 3 种工作状态,可分别工作在 5G/WiMAX/WLAN 频段,天线的尺寸仅为 26 mm×32 mm×1 mm,更加适合于小型移动通信设备。该天线通过结合一个新的辐射贴片元件以及开槽和开关来实现天线不同工作模式的切换。整体结构可分为微带贴片天线和直流偏置电路 2 部分,直流偏置电路由 4 个二极管构成的 2 组开关 SW1、SW2 和直流偏置线组成,通过对 SW1 和 SW2 的控制,天线可以在宽带和 2 种双频状态下工作,宽带工作频段为 3.04~5.54 GHz,一种双频工作频段分别为 2.86~3.50 GHz、5.09~6.17 GHz,另一种双频工作频段分别为 2.98~3.84 GHz、4.61~5.88 GHz。对天线模型实物加工并进行了实测。优化测试表明,天线可以在宽带模式和 2 个双频工作模式下正常工作,且天线的可重构特性使其能在 5G/WiMAX/WLAN 不同通信频段下切换工作模式,适合于 5G/WiMAX/WLAN 信号源聚集的复杂通信环境。

关键词:可重构天线;小型化;低剖面;移动设备;“V”形槽

中图分类号: TN822 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-1891(2023)01-0090-08

Design and Implementation of a Low-Profile Frequency Reconfigurable Antenna

MA Jianguo, WANG Zhonggen, MU Weidong

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science
and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: In response to the problems of overly large size, insufficient adjustable frequency range, narrow bandwidth and difficulty in covering 5G/WiMAX/WLAN and other common frequency bands, this paper proposes a novel structure of frequency reconfigurable antenna with three operating states, which can work in the above frequency bands respectively. The size of the antenna is only 26 mm×32 mm×1 mm, which makes it more suitable for small mobile communication devices. The antenna is designed to switch between different modes of antenna operation by combining a new radiating patch element with slotting and switching. The antenna consists of two parts: microstrip patch antenna and DC bias circuit. The DC bias circuit consists of two sets of switches SW1 and SW2 consisting of four diodes and DC bias lines. By controlling SW1 and SW2, the antenna can work in broadband and two dual-band states. The broadband operating bands are 3.04~5.54 GHz. One dual-band operating bands ranges between 2.86~3.50 GHz and 5.09~6.17 GHz, and another dual-band operating bands ranges between 2.98~3.84 GHz and 4.61~5.88 GHz. The antenna model is physically processed and measured. The optimization test shows that the antenna can work normally in broadband mode and two dual-band operating modes, and the reconfigurable characteristics of the antenna enable it to switch operating modes in different communication bands of 5G/WiMAX/WLAN, which is ideal for complex communication environments where 5G/WiMAX/WLAN sources are aggregated.

Keywords: reconfigurable antenna; miniaturized; low-profile; portable devices; V-shaped slot

收稿日期: 2022-10-03

基金项目: 安徽省自然科学基金(2108085MF200); 安徽高校自然科学基金重点项目(KJ2020A307); 安徽理工大学研究生创新基金(2021CX2070)。

作者简介: 马建国(1998—), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 天线理论与设计、可重构天线研究与设计。

0 引言

随着集成电路的飞速发展,单个通信设备可以集成支持多种通信频段的系统,如5G(3.3~4.4 GHz)、WiMAX(3.0~3.8 GHz)、WLAN(5.150~5.825 GHz),这些通信标准使用不同的通信频段,因此单一频段的天线并不能满足新一代的通信设备。通过集成不同频段的若干个天线到一个系统上可以有效增加频段,但是不同功能的独立天线的集成又会使通信设备体积变大,这不符合通信设备发展的趋势。性能固定的天线因其性能基本参数如频率、极化方向、方向图等保持不变而无法满足上述要求。超宽带天线可以解决这一问题,但是超宽带天线波束指向性强,通信距离短,同时频带利用率较低,而频率可重构天线能更好地解决这一问题,其方法是通过改变天线的结构,进而改变天线上的电流分布。改变天线的结构并不是多个传统天线的简单叠加,天线的某一参数的改变会对天线所有工作模式产生难以预测的影响,因此可重构天线的设计需要高效的电磁分析手段。可重构天线按照实现可重构的性能参数,可以分为频率可重构^[1]、极化方向可重构^[2]以及方向图可重构^[3-4]。单一天线能以多种工作模式在所希望的多种频段内工作是天线未来发展的趋势,可重构天线的优势是对天线的工作频率进行重新配置,能满足设备在期望频段通信要求的同时避免与其他通信频段产生干扰。

可重构天线的概念最早由Schaubert等^[5]于1983年提出。频率可重构天线因其频率可重构的特性,使其可以在用户指定的频段内工作的同时避免与天线的其他频段产生干扰,在近年来得到了广泛应用。Fertas等^[6]使用共面波导馈电,在馈线上刻蚀“C”形槽对其研究的双频天线的高频工作点做出了明显的调整,采用二极管控制天线枝节来实现天线在4个频段工作;Mudda等^[7]通过缺陷的结构技术使天线工作频段增多,又通过在开槽处放置二极管来实现对天线地板上开槽结构进行可重构,最终实现在2.3~8 GHz频谱范围内拥有6个可用频段;Awan等^[8]通过在设计的宽带天线辐射贴片上开槽处放置二极管,实现在双频带和三频带工作;在采用各种技术手段实现频段多样化的同时,研究人员通过蚀刻槽^[9],加载超材料^[10],插入分裂环谐振器(SSR)^[11]和枝节加载^[12]等技术手段来实现对非期望频段实现缺口;Ghaffar等^[13]在三角形宽带单极子天线的基础上开出2个嵌套式分布的“V”形槽,分别控制2个陷波频段,从而使天线能工作在宽带、双频和

三频3种状态下;李蕾等^[14]采用削顶圆形结构的辐射贴片作为辐射主体,使用嵌套式“C”形开槽结构,并使用二极管分别控制2个开槽的作用与否,最终设计天线能在UWB、2种单陷波和双陷波共4种状态下工作。以上天线都具有尺寸小的优点,在小型移动通信设备上有很大的应用空间。先前的研究只关注天线能否工作在更多的频段和更宽的带宽,而当前随着通信技术的迅速发展,各种通信协议的制定丰富了通信系统的频段,如5G、WiMAX和WLAN等主流通信协议,这类频段在频谱中分配紧密,彼此之间易产生互扰。在天线接收此类信号之前使用滤波器滤除非期望频段信号可以解决此问题,但滤波器的使用需要匹配电路来匹配滤波器和天线的阻抗,在精密复杂的通信系统中通常很难有多余空间来容纳这些额外的器件,因此采用不需要额外滤波器的频率可重构天线解决上述问题是更好的选择。与此同时难以分别覆盖5G、WiMAX和WLAN等常用频段又是目前频率可重构天线存在的问题之一,故而设计出能够工作在上述频段的频率可重构天线,以适应用户对通信系统的要求十分重要。

本文设计了一种可用于便携式设备的可重构天线。为了能使天线从原始结构的单一工作频段变为可以在几个频段乃至宽带随意切换工作状态,在天线的馈线上刻蚀了一个“C”形槽,为天线引入了一个高频谐振点,同时刻蚀的“C”形槽致使原先谐振频点的谐振深度减弱,因此在馈线两侧加入“L”型贴片用以增强谐振深度。在实现天线多种频段工作之后,引入2组PIN开关对,通过控制2组PIN开关对的通断状态来实现辐射贴片上开“V”形槽和对“V”形槽的位置控制,从而对天线的不同工作状态频段进行切换。最终设计的天线通过外部直流偏置电路控制,实现了天线在2种双频工作模式(2.86~3.50 GHz, 5.09~6.17 GHz), (2.98~3.84 GHz, 4.61~5.88 GHz)和1种宽带工作模式(3.04~5.54 GHz)之间切换。此外,天线尺寸仅为26 mm×32 mm×1 mm,3种工作模式覆盖的频段包括5G、WiMAX和WLAN,可以用于便携式移动设备。

1 天线设计

1.1 天线结构

天线由微带贴片天线和直流偏置电路2部分组成。如图1所示,天线印刷在尺寸为26 mm×35 mm×1 mm、介电常数为4.4、损耗角正切值为0.02的FR4介质基板上。天线的主要辐射贴片为绕中心旋转45度的正方形结构,使用同轴馈电。在馈线上刻蚀一

个“C”形槽,同时在辐射贴片上分刻蚀出一个环形槽结构。在刻蚀的环形槽的4个中心位置分别放置4个PIN二极管,按照上下位置分为2组,形成2个开关 SW_1 和 SW_2 ,从而实现天线工作频率的可重构。直流偏置电路包含上述位置放置的4个型号为SMP1320-079LF的贴片PIN二极管和2条直流偏置线,2条直流偏置线分别连接到贴片天线环形槽的两侧,用以控制开关 SW_1 和 SW_2 的开关。经过仿真优化过后的天线结构尺寸参数如表1所示。

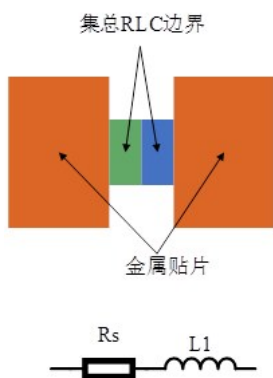


图1 天线结构示意图

表1 天线结构尺寸表

参数变量名	取值/mm
L_1	14.14 (0.25 λ)
L_2	14.14 (0.25 λ)
L_s	32.00 (0.56 λ)
W_s	26.00 (0.45 λ)
L_g	12.00 (0.21 λ)
L_f	11.50 (0.20 λ)
W_f	3.00 (0.05 λ)
L_c	5.4 (0.09 λ)
W_c	2.40 (0.04 λ)
L_p	6.00 (0.10 λ)
W_p	4.00 (0.07 λ)
g_2	0.40 (0.01 λ)
g_1	1.41 (0.02 λ)
s	1.00 (0.02 λ)

1.2 天线演进过程与理论分析

本文提出的可重构天线受传统四分之一波长矩形单极天线所启发^[12]。设计矩形单极天线的长度 L 使用公式(1)进行计算^[8]。

$$L = \frac{c}{4f_c \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1)$$

式中: c 为光速; f_c 为中心频率,选取4 GHz; ϵ_{eff} 为有效介电常数,可以通过式(2)计算:

$$\epsilon_{eff} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left\{ \left(1 + 12 \frac{W_s}{H} \right)^{-0.5} \right\} \quad (2)$$

式中: H 为介质基板的厚度; W_s 为介质基板的宽度; ϵ_r 为介质基板的相对介电常数。

采用同轴馈电方式在HFSS仿真软件上进行仿真,结果表明,计算产生的第1阶段单极天线在3.65 GHz、5.2 GHz和7.8 GHz处产生共振,其阻抗带宽范围是3.23~5.98 GHz和7.33~8.17 GHz。虽然此天线提供了较宽的阻抗带宽,但没有满足设计目标,所期望的频段是覆盖5G(3.3~4.4 GHz)、WiMAX(3.0~3.8 GHz)和WLAN(5.150~5.825 GHz)。

在演进第2阶段采用了截断天线辐射贴片的角来提升带宽的方式^[13]。如图2a和2b所示,矩形辐射贴片的一角由于整体旋转了45°而被截断,同时这一操作使得辐射贴片有效辐射长度增大,从而使谐振向低频转移。由于正方形的原因,电流均匀地分布在辐射贴片的表面,有效辐射长度的增大和电流的均匀分布改善了天线在低频率下的阻抗匹配,从而使天线的阻抗带宽扩宽为3.26~6.45 GHz。且在4.5 GHz附近有明显的波峰趋势出现,如图3所示,因此在第3阶段,目的是对第2阶段模型在4.5 GHz左右的波峰趋势进一步加强,减弱该频点处的谐振强度。对贴片结构进行了一些开槽处理,如图2c所示,在辐射贴片上分刻蚀出一个环形结构槽,仿真结果表明,明显减弱了4.5 GHz左右的谐振强度,使该天线变成了一个双频天线,并且由于开槽的缘故,给该天线谐振频率的可调节提供了可能。

在第3阶段中该双频天线工作的高频工作点为7 GHz,不符合所期望的高频工作点,故而在第4阶段,在天线的馈线上刻蚀出“C”形槽以对天线的高频工作点做出优化^[6]。“C”形槽的长度可以通过公式(3)计算^[14-15]。

$$L_{slot} = \frac{c}{f_{slot} \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}} \quad (3)$$

式中: L_{slot} 为开槽的长度; f_{slot} 为开槽中心频率,由此可以计算出天线开槽的长度为15 mm。

经过仿真测试结果表明,该天线的高频工作点由原先的7 GHz降低到了6.3 GHz,同时第3阶段中的天线的工作频段低频部分由于在馈线上引入了“C”形槽,导致带宽极大地扩宽。为了缓解因引

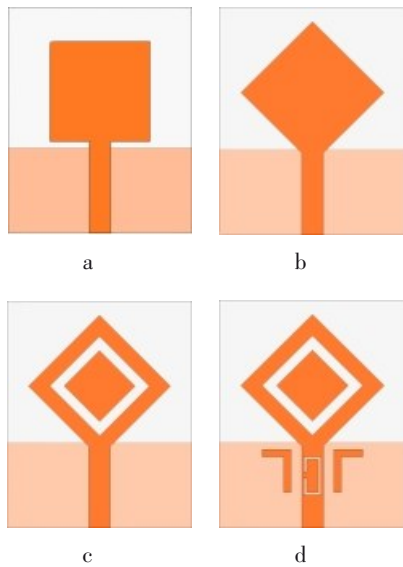


图 2 天线结构演进过程示意图

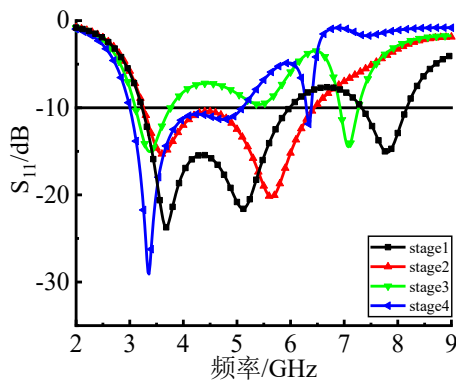


图 3 演进过程反射系数

入“C”形槽而导致的谐振强度减弱,在馈线两侧分别各加入“L”形枝节以增强匹配,如图 2d 所示。

1.3 可重构结构设计

为了克服由于各种应用的频段分配紧密而导致的频段拥塞问题,同时为了最大限度减少天线接收所期望频段信号时附近的非期望频段信号的潜在干扰,利用天线表面开槽对非期望频段干扰进行精准陷波,陷波频段可以通过开槽的长度进行控制。于开槽每条边的中心位置处放置二极管,连接槽的两侧,形成“V”形槽进行陷波操作,槽的有效长度 L_e 和缺口频段 f_d 的关系可以通过如下公式计算^[17]。

$$L_e = \frac{c}{2f_d \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4)$$

$$L_e = L_2 + 2g_1 \quad (5)$$

在天线开槽位置放置的 2 组共 4 个二极管如图

1 所示,2 个开关组分别为 SW_1 和 SW_2 ,根据控制通断分为 3 个模式,如表 2 所示,不同状态下对应天线模型如图 4 所示,不同的二极管状态会改变天线刻蚀“V”形槽的位置^[18],而不同位置的开槽会在天线表面形成不同的电流分布,对不同的非期望频段产生陷波,从而使天线工作在不同的期望频段。

表 2 天线工作模式

模式	SW_1	SW_2	频带
状态 1	关	开	双频段
状态 2	开	关	双频段
状态 3	关	关	宽带

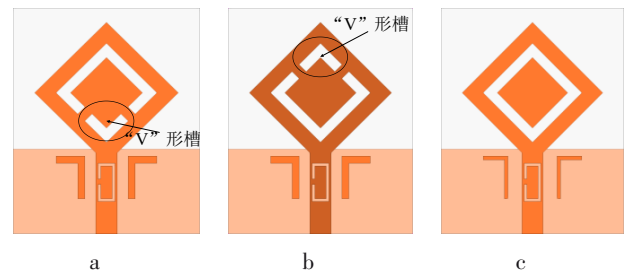


图 4 不同工作状态下天线模型图

在使用高频结构仿真软件 HFSS 软件对天线的仿真建模中,使用集总 RLC 边界条件功能模拟二极管^[7],二极管的导通和截至 2 种状态下对应的仿真模型如图 5 所示。

可以通过上述方法实现对二极管的仿真建模,但是在实物加工和测试中,直流偏置电路给天线带来的不利影响,直流偏置电路和射频天线电路必须在一定程度上隔离。具体做法是使用一个 100 pF 的电容防止直流电流到达天线,再使用一个 33 nH 的电感防止射频电流流向 PIN 二极管^[7],如图 6 所示。

1.4 参数扫描分析

为了使天线工作频段更为丰富,本文天线采用了缺陷地板技术,对地板进行参数扫描分析,发现地板的长度 L_g 对天线的反射系数影响很大,并且对天线各个工作模式的影响均不相同。改变地板的长度可以有效改变天线各个工作状态下的频段范围,结果如图 7 所示。当 L_g 从 11 mm 增加到 13 mm 时,状态 1 双频工作模式的低频带宽逐渐扩宽,中心频率向较高频移动,高频亦然;状态 2 双频工作模式的高频 S_{11} 逐渐加强,但是带宽逐渐减小;状态 3 宽带工作模式随着 L_g 的增大,带宽明显扩宽,反射系数也是逐步加强,当 L_g 为 13 mm 时,带宽扩宽明显且 S_{11} 都远小于 -10 dB,但是状态 1 和状态 2 的 S_{11} 曲线

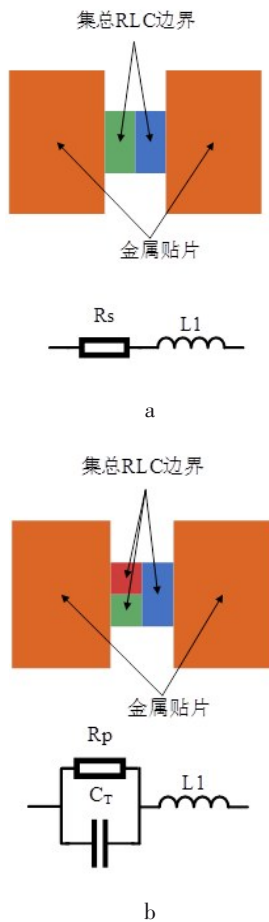


图5 二极管等效模型

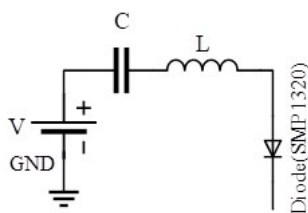


图6 二极管偏置电路

几乎重合,因此综合考虑天线的3个工作模式,最终

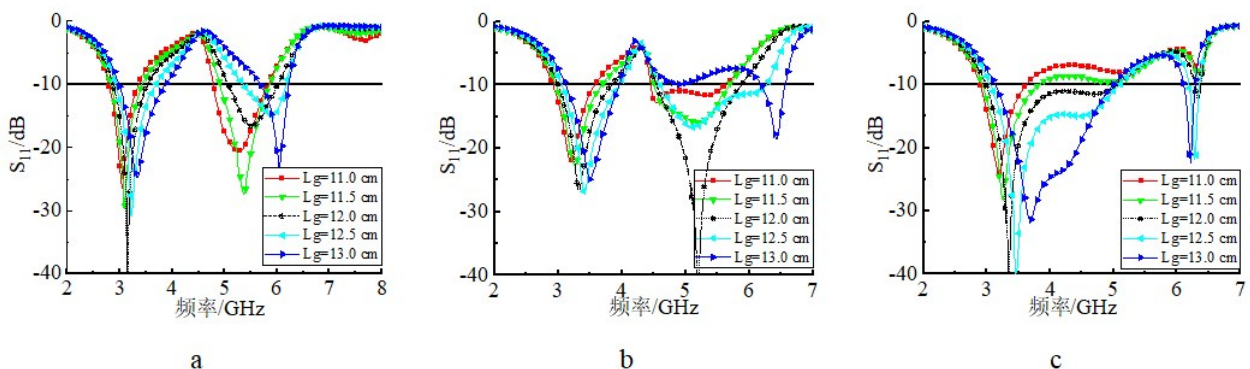


图7 地板长度 L_g 对反射系数的影响

选择 L_g 的值为 12 mm,避免了状态 1 和状态 2 工作频段的重复,同时状态 3 宽带模式带宽良好。

图 8 为“L”型枝节与馈线之间的不同距离 p 的 S_{11} 仿真曲线。可以看出:当其距离 p 从 0.1 mm 增加到 0.5 mm 时,状态 1 低频处 S_{11} 进一步降低,同时覆盖频段基本保持不变;状态 2 低频处 S_{11} 也明显降低,高频处中心频率向更高频处移动,有利于凸显双频特点,同时 S_{11} 曲线进一步降低;状态 3 在 p 为 0.1 mm 时,带宽为 1 GHz 左右,后续部分频段有 1.5 GHz 带宽频段谐振深度为 $-8 \sim -10$ dB,随着距离 p 的增大,谐振深度逐渐加深到 -10 dB 以下,极大扩充了状态 3 的带宽。

当开关 SW_2 截止、 SW_1 导通时,天线工作在双频模式 2 下,此时天线的工作频段为 2.98~3.84 GHz 和 4.61~5.88 GHz,回波损耗 S_{11} 曲线如图 9 中状态 1 所示,精准并完全覆盖了 WiMAX 通信频段。

当开关 SW_1 截止、 SW_2 导通时,天线工作在双频模式 1 下,此时天线的工作频段为 2.86~3.50 GHz 和 5.09~6.17 GHz,回波损耗 S_{11} 曲线如图 9 中状态 2 所示,精准覆盖 5G 部分的 WLAN 通信频段。

当开关 SW_1 和 SW_2 同时截止时,如图 4c 天线工作在宽带模式下,此时工作频段为 3.04~5.54 GHz,能完全覆盖 5G 通信频段,回波损耗 S_{11} 曲线如图 9 中状态 3 所示。

1.5 电流分布

为了分析频率可重构天线的原理,确定天线可重构部分对频率的影响,进一步对其表面电流分布图进行分析,图 10 给出了天线在 3 种工作状态谐振模式下的电流分布,可以看出馈线上开“C”形槽阻断了电流的流向,使低频电流集中在开槽开口处;图 5a 和 b 分别为天线工作在状态 1 和状态 2 状态下的电流分布,天线工作在 5.5 GHz 和 5.2 GHz 时,电流主要流经 2 种模式下不同的开关,并聚集在不同

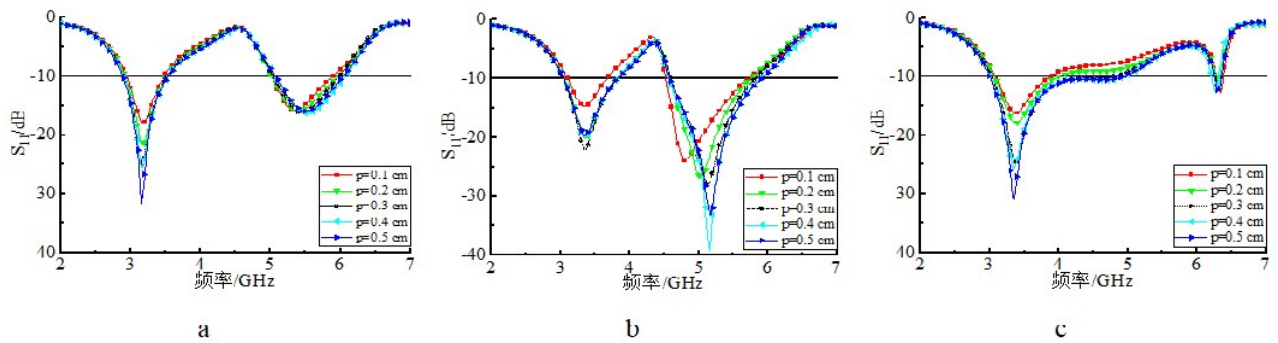


图 8 L型枝节与馈线距离对反射系数的影响

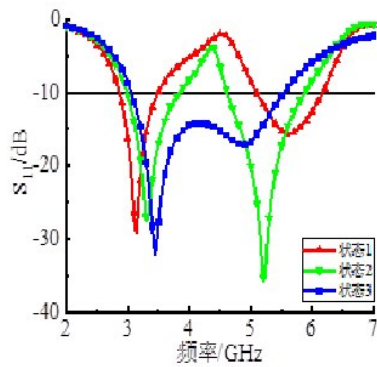


图 9 不同工作状态下回波损耗

开关构成的上下“V”形槽附近。图 5c 为天线工作状态 3 下的电流分布,可以看出由于此状态下二极管全部截止,电流均匀分布在天线环状结构上,形成谐振,工作在宽带模式下。

电压驻波比(VSMR)是反映反射损耗的另一种

方法,对表 2 中不同工作模式下天线的 VSMR 进行仿真分析,结果如图 11 所示,对于所有谐振频段, VSMR 均小于 1.8。

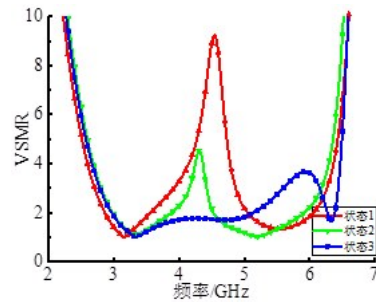


图 11 不同工作状态下电压驻波比

2 天线实测结果及分析

为验证天线性能以及实际可用性,天线实物及加工的直流偏置电路如图 12 所示。应用 Agilent N5247A 矢量网络分析仪对天线进行了测量,测试环境如图 13 所示。

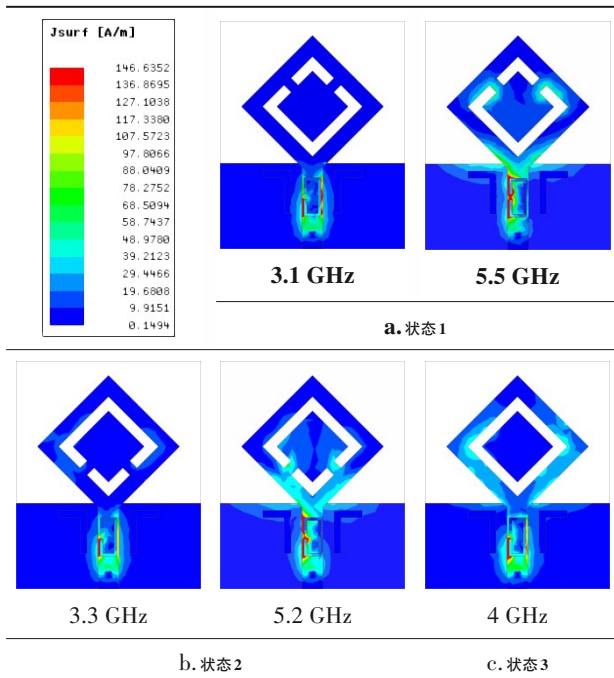
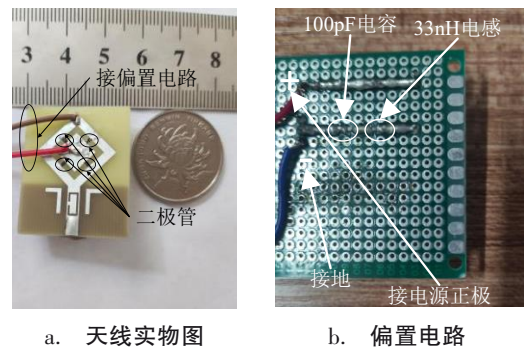


图 10 不同工作状态下的表面电流分布



a. 天线实物图 b. 偏置电路

图 12 天线实物图和暗室中的天线测量图

仿真和实测的天线反射系数结果如图 14 所示,天线的工作模式 1 的频段为 2.86~3.50 GHz 和 5.09~6.17 GHz,相对带宽分别为 20.1% 和 19.2%,与之对应实测频段范围为 2.80~3.50 GHz 和 4.98~6.20

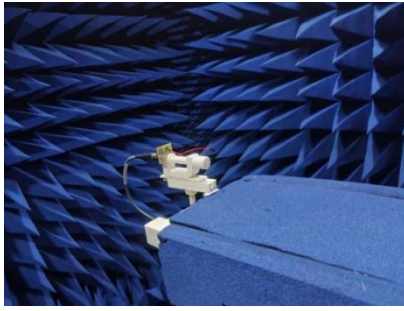


图 13 暗室中的天线测量图

GHz;工作模式 2 频段为 2.98~3.84 GHz 和 4.61~5.88 GHz,相对带宽分别为 25.2% 和 24.2%,与之对应实测频段范围为 2.95~3.80 GHz 和 4.60~5.90 GHz;天线工作模式 3 的频段为 4.61~5.88 GHz,相对带宽为 58.3%,与之对应实测频段范围为 2.98~5.55 GHz。将测试结果与仿真结果对比分析,实测结果和仿真结果 S_{11} 参数基本一致,工作频段处中心频点略有偏移,且 S_{11} 参数稍有上升,这主要是在天线实物制作过程和直流偏置电路焊接时产生的误差所导致的。

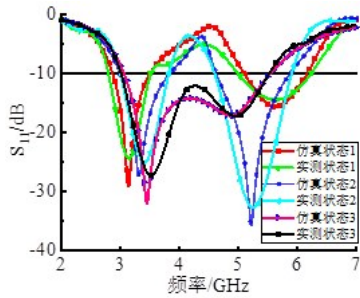
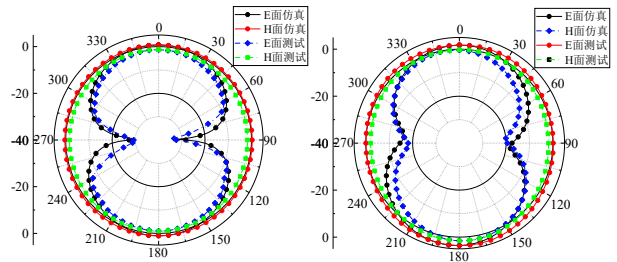


图 14 不同工作状态下的仿真和测量结果

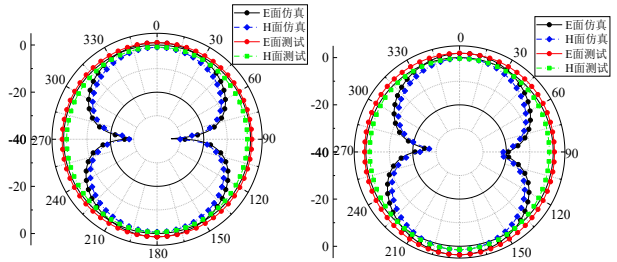
分别在 3.1 GHz、3.3 GHz、5.2 GHz 和 5.6 GHz 频点下,对本文天线的辐射方向图进行仿真和测试,结果如图 15 所示。可以看出:提出的天线在各频点辐射方向图基本一致,在 E 面(YOZ 面)方向图均呈现“8”字形的定向辐射特性;H 面(XOZ 面)的仿真方向图在所选取频点处具有全向辐射特性,实测方向图和仿真基本一致,辐射强度略微下降,满足天线正常工作的要求。

图 16 为提出的天线的峰值增益仿真与实测对比图,结果表明:天线能达到的增益的最大值为 3.6 dBi,可以满足天线正常工作的要求,实测所达到的增益最大值为 3.4 dBi,且实测变化趋势基本符合仿真结果。

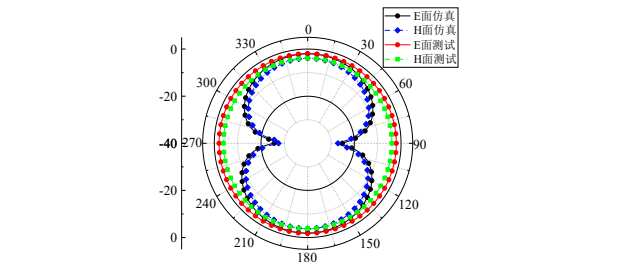
将本文设计的频率可重构天线与参考文献中天线的尺寸、工作频带与带宽范围进行对比,通过对比可以看出,本文提出的天线在尺寸上更小,结构更加紧凑,覆盖频带数更多,工作带宽更宽(表 3),相对于其他可重构天线具有明显的优势,能够用于无线通信网络。



a. 状态 1 辐射方向图 3.1 GHz 5.6 GHz



b. 状态 2 辐射方向图 3.3 GHz 5.2GHz



c. 状态 3 方向图 3.3GHz

图 15 不同工作状态下的归一化方向图

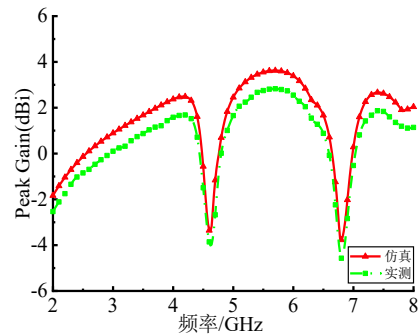


图 16 天线峰值增益实测图

表 3 本文天线与参考文献中天线对比

文献	尺寸/mm	开关数	频带数	带宽/MHz
[6]	24×29×1.6	4	3	900~2 500
[13]	30×30×1.9	2	4	300~1 500
[19]	32×82×1.6	3	3	490~1 360
[20]	40×48×1.6	2	5	630~1 820
[21]	40×32×1.6	4	9	190~1 400
本文	32×26×1	4	6	860~2 500

3 结论

提出了一种新的低剖面频率可重构天线,该天线主要由刻蚀环形槽的方形贴片、1 条微带线、2 个“L”形枝节以及缺陷地组成,尺寸仅为 26 mm×32 mm×1 mm。通过控制 2 组开关的通断配合环形槽,形成不同位置的“V”形开槽来改变天线的局部结构

和表面电流分布,使天线包含双频和宽带特性,得到可在 (2.86~3.50 GHz, 5.09~6.17 GHz) (2.98~3.84 GHz, 4.61~5.88 GHz) 和 (3.04~5.54 GHz) 3 种频段内实现可重构性能的谐振频段,阻抗带宽为 19.2%~58.3%,峰值增益最大值达到 3.6 dBi。可以良好地覆盖 5G、WiMAX、WLAN 等通信频段,在移动便携式设备和物联网等平台上有着良好的应用前景。

参考文献:

- [1] AHMAD H, ZAMAN W, BASHIR S, et al. Compact triband slotted printed monopole antenna for WLAN and WiMAX applications[J]. International journal of RF and microwave computer-aided engineering, 2020, 30(1): e21986.
- [2] ALAM M S, ABBOSH A M. Wideband pattern reconfigurable antenna using pair of radial radiators on truncated ground with switchable director and reflector[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 24-28.
- [3] 张永亮, 方琴, 巫钊, 等. 低剖面极化可重构超表面天线[J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 912-917.
- [4] MAK H M, LAI H W, LUK K M. Polarization reconfigurable circular patch antenna with a C-shaped[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(3): 1388-1392.
- [5] 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.
- [6] FERTAS F, CHALLAL M, FERTAS K. A compact slot-antenna with tunable-frequency for WLAN, WiMAX, LTE, and X-Band applications[J]. Progress in Electromagnetics Research C, 2020, 102: 203-212.
- [7] MUDDA S, KM G, MALLIKARJUN M. Wide-Band frequency tunable antenna for 4G, 5G/Sub 6 GHz portable devices and MIMO applications[J]. Progress in Electromagnetics Research C, 2022, 118: 25-41.
- [8] AWAN W A, HUSSAIN N, LE T T, et al. Ultra-thin flexible fractal antenna for 2.45 GHz application with wideband harmonic rejection[J]. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 2019, 110: 152851.
- [9] HUSSAIN N, AWAN W A, GHAFAR A, et al. A compact flexible frequency reconfigurable antenna for heterogeneous applications[J]. IEEE Access, 2020, 8: 173298-173307.
- [10] RAHMAN U S, CAO Q S, WANG Y, et al. Design of wideband antenna with band notch characteristics based on single notching element[J]. International journal of RF and Microwave Computer-aided Engineering, 2019, 29(2), e21541
- [11] LUO S, CHEN Y Q, WANG D Q, et al. A monopole UWB antenna with sextuple band-notched based on SRRs and U-shaped parasitic strips[J]. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 2020, 120, 153206.
- [12] GHAFAR X, LI X J, SEET B -C, et al. Compact multiband frequency reconfigurable antenna for 5G communications[C]. International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC), Auckland, New Zealand, 2019.
- [13] GHAFAR A, LI X J, AWAN W A, et al. Design and realization of a frequency reconfigurable multimode antenna for ISM, 5G-Sub-6-GHz, and S-Band applications[J]. Applied Sciences, 2021, 11(4): 1635.
- [14] 李蕾, 季红妍, 张舜, 等. 一种小型化双陷波可重构 UWB 天线设计[J]. 电波科学学报, 2021, 36(2): 313-320.
- [15] 南敬昌, 王艺靡, 高明明, 等. 一种小型化四陷波超宽带天线设计与研究[J]. 电波科学学报, 2021, 36(4): 611-618.
- [16] KHAN M S, NAQVI S A, IFTIKHAR A, et al. A WLAN band-notched compact four element UWB MIMO antenna[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-aided Engineering, 2020, 30(9): e22282.
- [17] NIAMAT H, MINJOO J, JIWOONG P, et al. A compact size 2.9-23.5 GHz microstrip patch antenna with WLAN band-rejection[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2019, 61(5): 1307-1313.
- [18] PARK J, JEONG M, HUSSAIN N, et al. A low-profile high-gain filtering antenna for fifth generation systems based on nonuniform metasurface[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2019, 61(11), 2513-2519.
- [19] MANSOUL A. Switchable multiband slot antenna for 2.4, 3.5 and 5.2 GHz applications[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2017, 59(11), 2903-2907.
- [20] KHAN T, RAHMAN M U. Design of low-profile frequency reconfigurable antenna for multiband applications[J]. International Journal Of Electronics Letters, 2020, 10(1): 30-47.
- [21] DILDAR H, ALTHOBIANI F, AHMAD I, et al. A design and experimental analysis of multiband frequency reconfigurable antenna for 5G and sub-6 GHz wireless communication[J]. Micromachines, 2020, 12(1): 32.