光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022122101

# 开槽式六边形多频带高增益微带天线仿真

陶鹏飞，曹斌照*，任英楠

（太原理工大学 物理学院，太原 030024）

**摘　要：** 随着无线通信技术的发展，小型化、多频带微带贴片天线在无线通信中得到了广泛应用。文章设计了一种六边形多频带微带天线，采用同轴线馈电，在六边形贴片的每个顶点内侧进行 120°的开槽。通过调整贴片开槽的几何形状和尺寸，能够有效地获得三种不同的谐振模式，可应用于 L 波段和 C 波段。用仿真软件 CST 对该种天线进行仿真及分析，其结果表明，在工作频段均满足增益 $G\geqslant 6$ dbi，回波损耗 $S_{11}<-10$ dB。该天线具有结构简单、体积小、增益良好的特点，适用于通信中 WiFi 频段。

**关键词：** 多频带；微带天线；同轴线馈电；六边形贴片

**中图分类号：** TN823　**文章编号：** 1001－5868(2023)02－0209－06

## Simulation of Slotted Hexagonal Multiband High Gain Microstrip Antenna

TAO Pengfei，CAO Binzhao，REN Yingnan

（School of Physics，Taiyuan University of Technology，Taiyuan 030024，CHN）

**Abstract：** With the development of wireless communication technology，miniaturized，multiband microstrip patch antenna has been widely used in wireless communication. In this paper，a hexagonal multiband microstrip antenna was designed with coaxial line feed and 120 degree slotting on the inside of each vertex of the hexagonal patch. Three different resonant modes could be effectively obtained by adjusting the geometry and size of the slotted patch，which could be applied to L-band and C-band. The simulation software CST was used to simulate and analyze this kind of antenna. The results show that the gain $G\geqslant 6$ dbi and the return loss $S_{11}<-10$ dB are all satisfied in the working band. The antenna has the characteristics of simple structure，small size and good gain，which can be applied to WiFi band in communication.

**Key words：** multiband；microstrip antenna；coaxial feed；hexagon patch

## 0　引言

微带天线具有体积小、重量轻、结构灵活、设计和制造简单等优点，已广泛应用于无线通信、遥感、导航、雷达等系统中。随着现代无线通信技术的进一步发展，对多频带天线的需求越来越多，研究人员对微带天线也非常重视[1-2]。与此同时，应用于各种无线通信技术的多频带天线的研究也日益增多。为了实现微带天线的多频带工作，最直接的方法是将多个具有不同谐振频率的辐射贴片置于同一个介质基板上，这种设计虽然结构简单，但将增大天线的尺寸[3]；也可采用重叠辐射贴片或加载寄生贴片构成叠层结构的形式设计多频天线[4-6]，但这样会使微带天线的厚度增加，体积变大，难以满足当今通信系统对天线低剖面、小型化的要求；通过设计合适的馈电网络，同时激励微带贴片天线的基模和高次模也可以实现双频工作[7-8]，但该种方式增加了设计的复杂性。本文提出在六边形微带贴片的每个贴片顶角内

**收稿日期：**2022－12－21.

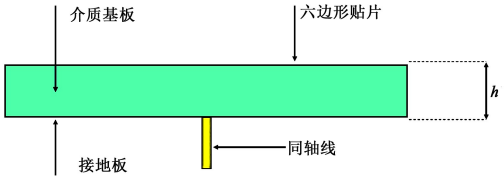
**基金项目：**国家自然科学青年基金项目(11904255)；山西省研究生教育创新项目(2018JG25).

* **通信作者：**曹斌照　**E-mail：**caobinzhao@tyut.edu.cn

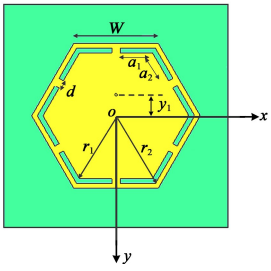
侧附近进行 120°的开槽，同时采用同轴线馈电方式，其优点在于馈电位置非常灵活，可以选取在任意位置；另外同轴电缆位于接地板的下方，避免了对天线辐射性能的影响；同时，不需要附加匹配，有利于减小天线尺寸。在等面积情况下，正六边形贴片相对于传统的矩形、三角形、圆形等贴片，用于辐射贴片的微带天线具有带宽较宽、功耗小、能量辐射效率高、更容易小型化的优势[9]，且能做到尽可能小的增益损失，在实现微带贴片天线多频带的同时也相对增加了天线的增益。本文基于六边形辐射贴片以及开槽技术，使天线工作于 L 波段和 C 波段，且满足小型化、高增益、多频带微带天线的设计要求。

## 1 天线设计

微带天线是贴片天线的一种，通常由基板上具有一定形状的金属贴片和另一侧的接地平面组成。本文提出的微带贴片天线结构如图 1 所示，其中图 1(a)，(b)分别为对应的侧视图和俯视图。




(a) 侧视图




(b) 俯视图

图 1 微带天线结构示意图

微带天线的介质基板材料为 Rogers RT5880（$\varepsilon_r=2.2$，$h=3$ mm），六边形贴片边长为 $W=30$ mm，接地板尺寸为 80 mm×80 mm。馈电方式选择同轴线馈电，该天线通过 50 Ω 的同轴线馈电，馈电点最终选择在 $y$ 轴上。在六边形贴片的六个内角附近进行 120°的开槽，通过调整开槽的宽度、开槽的对称性，以及开槽的长度来实现天线中心谐振频率的改变，从而达到天线工作在相应频点的要求。本文选择的贴片形状为正六边形，与其他形状的贴片对比，该种形状的贴片边缘角度变化较为缓慢，电流在贴片上表面流动时就会变得缓慢，中心频点附近的频率可满足谐振的要求[9]。相比于其他形状贴片，带宽可以相对增加。六边形微带贴片天线谐振频率的公式为[10]：

$$f=\frac{c}{2(S_{\text{eff}}+2\Delta l)\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}} \tag{1}$$

其中，

$$\varepsilon_{\text{eff}}=\frac{\varepsilon_r+1}{2}+\frac{\varepsilon_r-1}{2}\left[1+12\frac{h}{W}\right] \tag{2}$$

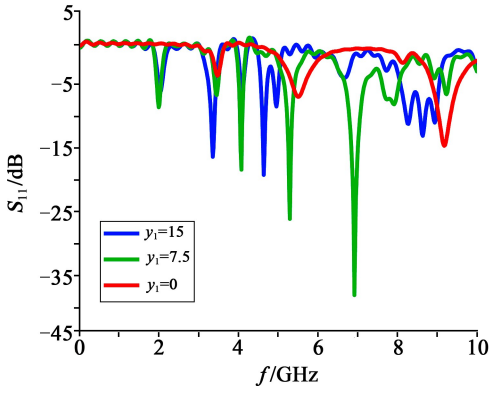
$$\Delta l=0.412h\frac{(\varepsilon_{\text{eff}}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.258\right)}{(\varepsilon_{\text{eff}}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \tag{3}$$

$$S_{\text{eff}}=\frac{1}{2}(2+\sqrt{3})W-\frac{7}{20}W-\frac{7}{20}\left(\frac{W}{2}-\frac{1}{100}\right) \tag{4}$$

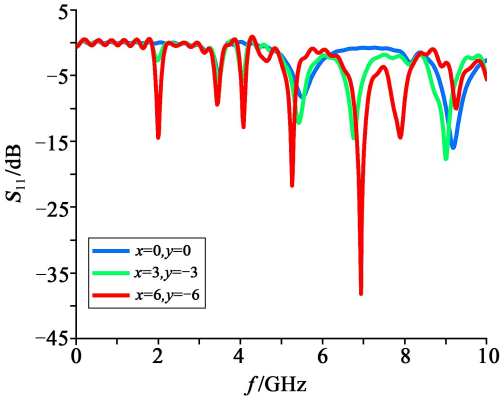
式中，$W$，$h$，$\varepsilon_r$ 分别是图 1 中六边形的宽度、介质基板的厚度以及介质基板的介电常数。

## 2 天线的仿真及分析

首先对天线的馈电位置进行选择。为了让同轴线的特征阻抗为 50 Ω，从而达到更好的匹配性能，馈电可以沿 $x$ 轴或 $y$ 轴移动，也可以沿对角线移动。图 2(a)、图 2(b)分别为馈点沿 $y$ 轴和对角线方




(a) 沿 $y$ 轴方向上馈电点位置对 $S_{11}$ 的影响

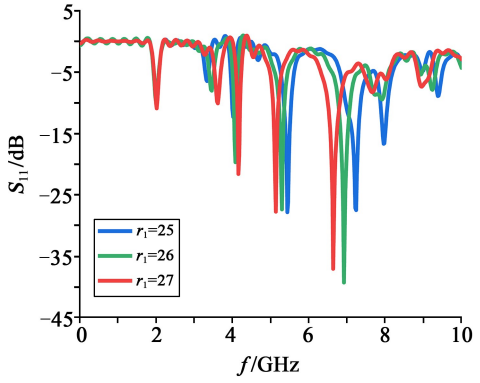



(b) 沿对角线方向上馈电点位置对 $S_{11}$ 的影响

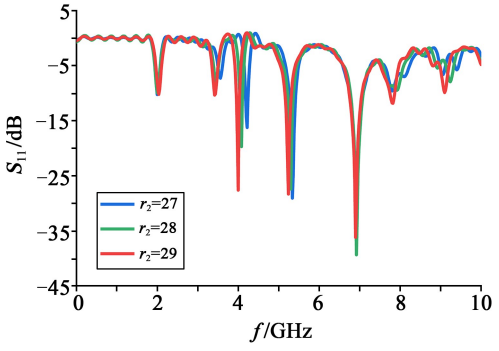
图 2 馈电位置对 $S_{11}$ 的影响

向移动时回波损耗 $S_{11}$ 的变化曲线。由图 2 可以看出，当馈电点沿 $y$ 轴负方向移动以及沿对角线正向移动时，天线的主要谐振频率点向左偏移。为了使天线满足设计要求，即工作在 L 段和 C 波段，并且使加工制作更为容易，本文中馈电点选取在 $y$ 轴负方向 $y_1$ 处，距原点 7.5 mm。

图 3 为开槽内、外半径 $r_1$ 和 $r_2$ 分别取不同值时 $S_{11}$ 随频率变化的曲线图。由图 3(a)可见，$r_1$ 的变化改变了 C 波段内的 4，5.3，6.9 GHz 谐振点，并没有改变 L 波段的谐振点，并且随着 $r_1$ 的增加，C 波段内谐振点发生左移；而由图 3(b)可见，$r_2$ 的变化主要改变 C 波段中 4，5.3 GHz 谐振点，并且随着 $r_2$ 的增加，该谐振点同样发生左移，对于 L 波段的 2 GHz，C 波段中的 6.9 GHz 没有影响。基于以上规律，本文在后面设计中选取 $r_1=26$ mm，$r_2=28$ mm，以实现更低的回波损耗。




(a) 开槽内半径 $r_1$ 对 $S_{11}$ 的影响




(b) 开槽外半径 $r_2$ 对 $S_{11}$ 的影响

图 3　$r_1$，$r_2$ 对 $S_{11}$ 的影响

当 $r_1$，$r_2$ 和馈电点位置确定后，进一步考虑开槽长度 $a_1$，$a_2$ 以及两开槽的间距 $d$ 对 $S_{11}$ 的影响。图 4 为当 $a_1=a_2$ 宽度 $d$ 取不同值时 $S_{11}$ 随频率变化的曲线图。由图 4 可以看出，随着 $d$ 的增加，位于 C 波段内的 5.30，6.92 GHz 谐振频点会相应右移；而对 L 波段内 2.03 GHz 的谐振频点几乎没有影响。分析比较表明，选取 $d$ 为 3 mm 时可达到最低的回波损耗。

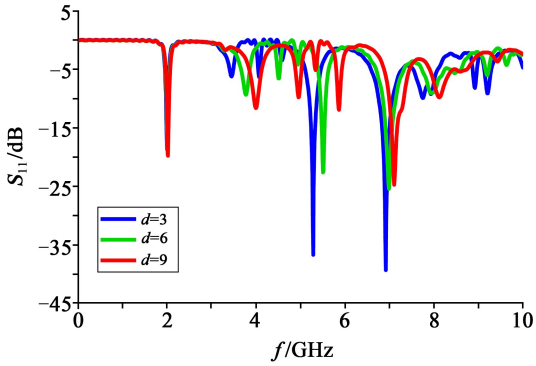
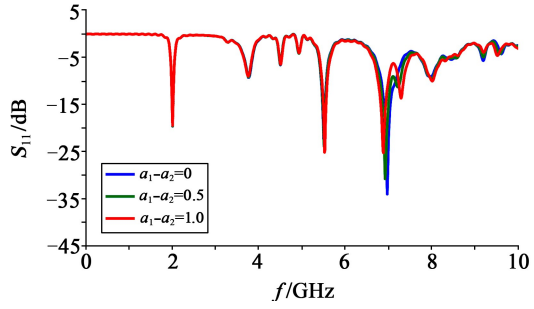
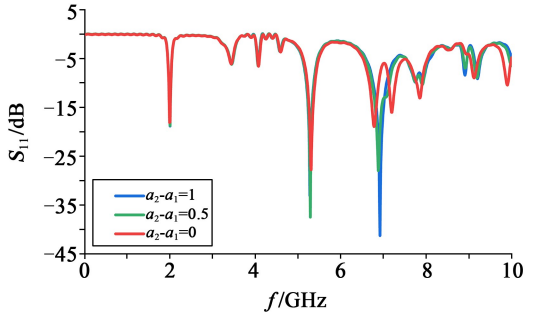



图 4　两开槽的间距 $d$ 对 $S_{11}$ 的影响

图 5 为开槽长度 $a_1 \geqslant a_2$ 对 $S_{11}$ 的影响关系。其中，图 5(a)为 $a_1 \geqslant a_2$（$d$ 的值保持 3 mm 不变）且 $a_1-a_2$ 逐渐增大时 $S_{11}$ 随频率变化的曲线；图 5(b)为 $a_1 \leqslant a_2$ 时（$d$ 的值保持 3 mm 不变）且 $a_2-a_1$ 逐渐增大时 $S_{11}$ 随频率变化的曲线。由图 5(a)可知，随着 $a_1-a_2$ 值的增加，天线在 C 波段 6.9 GHz 的谐振频点发生左移；由 5(b)可知，随着 $a_2-a_1$ 值的增加，天线在 C 波段 6.9 GHz 的谐振频点发生右移。出现上述现象的原因，是由于开槽的不对称性导致该谐振频点的辐射场在微带贴片上电流路径发生改变，从而谐振频点发生了偏移。由于六个开槽具有完全对称性，在上述仿真分析时，六边形辐射贴片上开槽的参数是同时改变的。基于此，可以根据




(a) $a_1 \geqslant a_2$ 对 $S_{11}$ 的影响



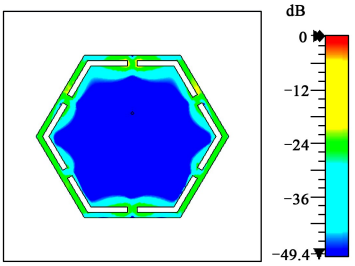

(b) $a_1 \leqslant a_2$ 对 $S_{11}$ 的影响

图 5　$a_1$，$a_2$ 对 $S_{11}$ 的影响

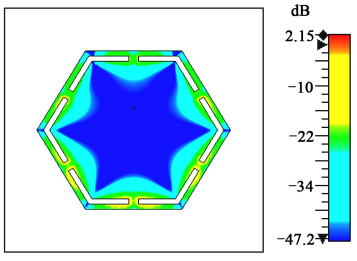
对谐振频率大小的要求，通过改变其尺寸实现对谐振频点的微调。

对天线各项参数确定时，由公式(1)～(4)可以得出，同尺寸的传统六边形微带天线的谐振频率约为 3.39 GHz，所以本文所设计的天线在 3.39 GHz 附近进行了频点个数的扩展。

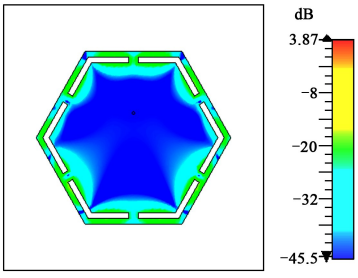
图 6 为谐振频率分别在 2.03，5.30 和 6.92 GHz 时天线的表面电流分布。根据天线表面电流分布及高次模的定义可知该天线工作的频段在高次模[11]。由图 6 可以看出，开槽的大小、对称性、形状影响了贴片表面电流的路径。电流主要集中在开槽缝隙周围，天线的缝隙改变了电流的路径，实现了多频点。




(a) 2.03 GHz



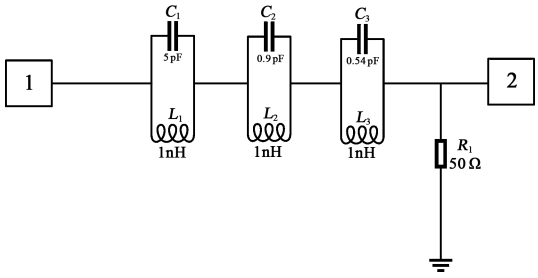

(b) 5.30 GHz



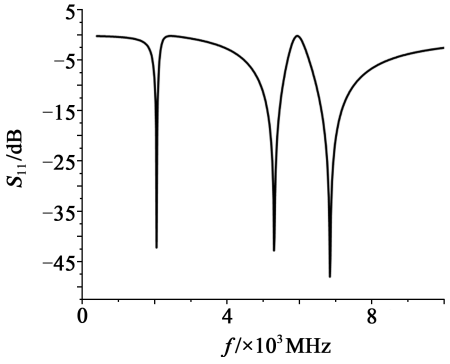

(c) 6.92 GHz

图 6 贴片表面电流分布

开槽六边形辐射贴片所构成的微带天线的等效电路图与 S 参数仿真结果如图 7 所示。其中，开槽六边形辐射贴片可以等效为三个谐振枝节，可理解为在传统的天线等效电路中串联三个 LC 并联谐振电路[12]。图 7(a)为本文仿真天线的等效电路，图 7(b)为等效电路 S 参数仿真图。从图 7(b)可以得出等效电路在 2.03，5.30，6.92 GHz 附近发生了谐振，产生了带阻，形成三个陷波频段，这与之前对天线的仿真分析结果基本相吻合。



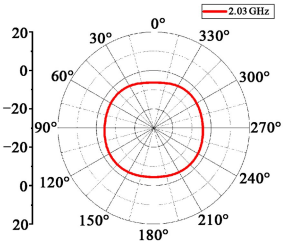

(a) 等效电路



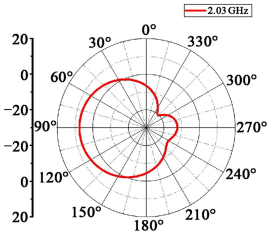

(b) 等效电路 S 参数仿真图

图 7 天线等效电路及 S 参数仿真结果

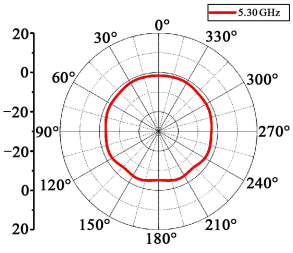
图 8 为本文设计的天线平面方向图。其中，图 8(a)～(f)分别为天线在谐振频点 2.03，5.30 和



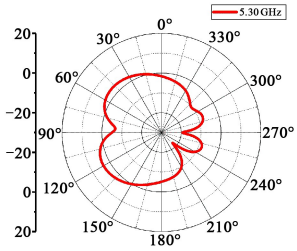

(a) 2.03 GHz E 面



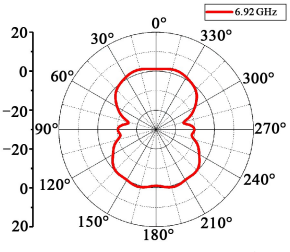

(b) 2.03 GHz H 面



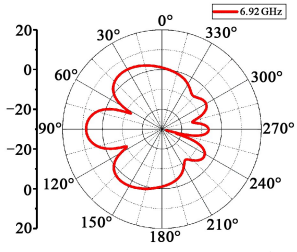

(c) 5.30 GHz E 面




(d) 5.30 GHz H 面




(e) 6.92 GHz E 面




(f) 6.92 GHz H 面

图 8 天线平面方向图

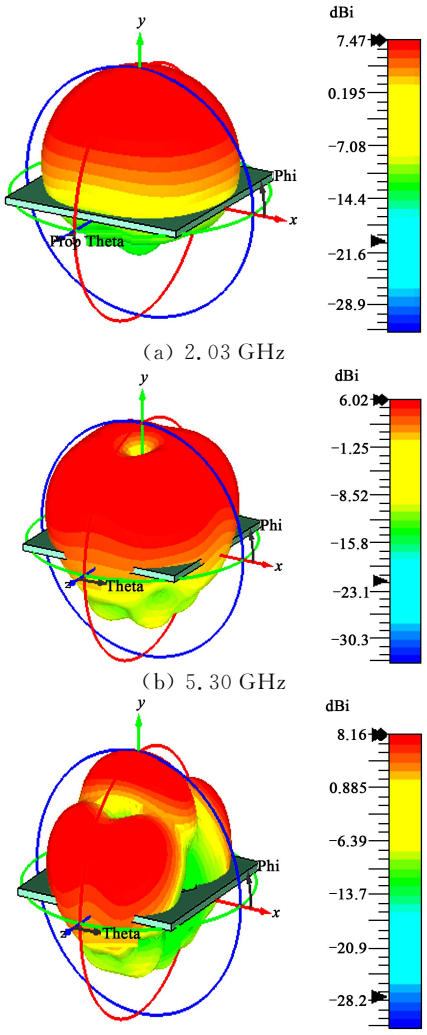



图 9　天线 3D 方向图

6.92 GHz 时 E 面与 H 面的平面方向图。图 9(a)～(c)为天线在相应频点的 3D 方向图。

由平面方向图 8、立体方向图 9 均可看出，在 2.03,5.30 GHz,E 面形状近似圆形，呈现全向辐射特性；在 6.92 GHz,E 面形状为“8”字形，呈现定向辐射特性；在 2.03,5.30 GHz,H 面为单一方向辐射，且辐射方向都在参考坐标系的 $y$ 轴正方向，在 6.92 GHz 的 H 面为 3 个方向辐射，虽然增加了副瓣与旁瓣，但主波束方向性明显增强，主辐射与 2.03,5.30 GHz 时的相同，也为参考坐标系的 $y$ 轴正方向。

表 1 为该天线的驻波比(VSWR)与增益随频率变化情况。表 2 为本文设计的天线与传统微带贴片天线、传统多频带天线的增益对比情况。从表 1 与表 2 中可以看出，本文设计的天线，相较于传统的微带贴片天线、传统的多频带天线，均实现了天线增益的提高，均可达到 6 dbi，且天线的增益变化较为平缓。另外，天线在各个工作频点上均有 $VSWR<2$，满足微带贴片天线设计要求。

**表 1　本文天线谐振点处驻波比、增益对比**

| 频率/GHz | 驻波比 | 增益/dbi |
|---|---|---|
| 2.03 | 1.87 | 6.79 |
| 5.30 | 1.14 | 6.0 |
| 6.92 | 1.05 | 8.21 |

**表 2　本文天线与传统多频带天线增益对比**

| 参数 | 本文 | | | 文献[13] | | 文献[14] | | 文献[15] | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 中心频率/GHz | 2.03 | 5.30 | 6.92 | 2.45 | 5.8 | 2.0 | 3.5 | 1.24 | 1.59 |
| 增益/dbi | 6.79 | 6.0 | 8.21 | 2.6 | 4.4 | 2.9 | 3.9 | 3.0 | 3.5 |

## 3　结论

本文设计了一种新型六边形多频带高增益微带贴片天线，在六边形辐射贴片的每个顶点内侧进行了 120°的开槽，同时使用同轴线馈电。天线的开槽缝隙改变了电流的路径，实现了多谐振频点。由高次模的电流分布可知：对于高次模，电流在不规则的边界形成谐振，可以产生具有方向性的高次模，从而拥有高增益的特性。通过仿真表明，本文设计的天线可以工作在 L 波段 2.0 GHz(1.98～2.03 GHz)，C 波段 5.30 GHz(5.19～5.37 GHz)、6.92 GHz(6.76～7.09 GHz)，均有增益 $G\geqslant 6$ dbi，具有较高增益；且 $VSWR\leqslant 2$，具有良好的匹配性能。本文的结论为多频带、高增益微带贴片天线的研究与应用提供了一定的参考价值。

**参考文献：**

[1] Jahagirdar D R, Stewart R D. Non-leaky conductor backed coplanar wave guide-fed rectangular microstrippatch antenna [J]. IEEE Microwave and Guided-Wave Lett., 1998, 3: 115-117.

[2] Pattnaik S S, Gianluca L, Gandhi O P. On the use of wide-band high-gain microstrip antenna for mobile telephones[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1998, 40(1): 88-90.

[3] 钟顺时. 天线理论与技术[M]. 第 2 版. 北京：电子工业出版社，2015.
Zhong Shunshi. Antenna Theory and Technology[M]. 2nd Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.

[4] Liu S, Wu W, Fang D G. Single-feed dual-layer dual-band E-shaped and U-slot patch antenna for wireless communication application[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett., 2015, 15(7): 468-471.

[5] 韩宇南，袁思雨，孙晓昱，等. 基于寄生耦合单元的多频段微

带天线设计[J]. 北京邮电大学学报，2018，41(4)：23-28.
Han Yunan，Yuan Siyu，Sun Xiaoyu，et al. Multiband microstrip antenna design using parasitic coupling elements[J]. J. of Beijing University of Posts andTelecommun.，2018，41(4)：23-28.

[6] Deng C，Li Y，Zhang Z，et al. Dual-band circularly polarized rotated patch antenna with a parasitic circular patch loading [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett.，2013，12(2)：492-495.

[7] Liu X Y，Li Y X，Liang Z X，et al. A method of designing a dual-band sector ring microstrip antenna and its application [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation，2016，64(11)：4896-4901.

[8] Zhang J D，Zhu L，Liu N W，et al. CP patch antenna with controllable polarisation over dual-frequency bands[J]. IET Microwaves Antennas & Propagation，2017，11(2)：224-231.

[9] 王英东，张立娟，刘芳焕，等. 不同形状微带贴片天线性能比较[J]. 河北工业大学学报，2017，53(4)：20-25.
Wang Yingdong，Zhang Lijuan，Liu Fanghuan，et al. Comparison of performance characteristics of different shapes in microstrip patch antenna [J]. J. of Hebei University of Technol.，2017，53(4)：20-25.

[10] Ray K P，Pandey M D. Resonance frequency of hexagonal and half hexagonal microstrip antennas[J]. Microwave and Optical Technol. Lett.，2009，51(2)：448-452.

[11] 林昌禄，聂在平. 天线工程手册[M]. 北京：电子工业出版社，2002.
Lin C L，Nie Z P. Antenna Engineering Manua[M]. Beijing：Publishing House of Electronics Industry，2002.

[12] Li Y S，Li W X，Ye Q B. A compact circular solt UWB antenna with multimode reconfigurable band-notched characteristics using resonator and switch techniques [J]. Microwave and Optical Technol. Lett.，2014，56(3)：570-574.

[13] 王远洋，赵 爽，崔 炜，等. 一种RFTD双频带天线的设计[J]. 微波学报，2017，33(2)：28-31.
Wang Yuanyang，Zhao Shuang，Cui Wei，et al. A kind of RFTD dual band antenna design[J]. J. of Microwaves，2017，33(2)：28-31.

[14] Yang J Q，Cao L H，Zhou C，et al. Design of miniaturized dual-band microstrip array antenna [J]. J. of Hubei University (Natural Science)，2021，43(1)：96-101.

[15] Boyko S N，Isaev A V，Maryanov V B. Compact dual-band antenna module for glonass/GPS GNSS receivers[J]. J. of Communications Technol. and Electronics，2020，65(6)：592-599.

## 作者简介：

**陶鹏飞**(1996—)，男，硕士生，主要研究方向为微带贴片天线，以及天线射频技术；

**曹斌照**(1967—)，男，博士，教授，硕士生导师，研究方向包括电磁波与微波技术、人工电磁材料及应用。