

文章编号: 1671-7449(2022)03-0272-05

一种全向环形缝隙阵列天线设计

刘宇峰, 曹 源, 张 骄, 张文梅

(山西大学 物理工程学院, 山西 太原 030006)

摘要: 提出了一种新型的全向平面缝隙阵列天线. 8对环形缝隙背靠背蚀刻于带状线两侧地板, 作为辐射单元, 并且通过中心导带串行馈电. 通过在环形缝隙内部加载一对Y形缝隙枝节, 提升单元辐射性能. 为进一步拓宽工作带宽, 提高增益, 采用遗传算法(GA)对天线进行优化设计, 根据设计结果加工制作了天线样品. 测量结果表明, 天线的阻抗带宽($|S_{11}| < -10$ dB)为5.69% (5.64 GHz~5.97 GHz), 峰值增益为9.68 dBi, 水平方向最大增益变化小于0.5 dB, 在工作频带内具有稳定的全向辐射性能.

关键词: 全向天线; 环形缝隙; 带状线; 缝隙阵列; 遗传算法

中图分类号: TN827+.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-7449.2022.03.015

Design of an Omnidirectional Annular Slot Array Antenna

LIU Yufeng, CAO Yuan, ZHANG Jiao, ZHANG Wenmei

(School of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: A novel planar slot array antenna with omnidirectional radiation in the horizontal plane is proposed. There are totally 8 back-to-back annular slots as radiators etched on both ground planes of the strip line, which are serially fed by the strip. The radiation performance of the element is improved by loading a pair of Y-shaped slot branches inside the annular slot. In order to further broaden the bandwidth and improve the gain, genetic algorithm (GA) is used to optimize the antenna parameters. A prototype antenna is fabricated and measured, and the results show that the impedance bandwidth ($|S_{11}| < -10$ dB) of the antenna is 5.69% (5.64 GHz~5.97 GHz), the peak gain is 9.68 dBi, and the gain variation in the horizontal direction is less than 0.5 dB. It exhibits stable omnidirectional performance over the impedance bandwidth.

Key words: omnidirectional antenna; annular slot; strip line; slot array antenna; genetic algorithm

全向天线因其能在水平面产生 360° 的均匀辐射而在无线通信领域有着广泛的应用. 经过多年发展已产生多种形式, 最为典型的是垂直偶极子和单极子全向天线^[1-2], 但它们的增益和带宽都是有限的. 在文献[2]中, 提出了一种在水平面上具有宽带和低增益变化的偶极子全向阵列天线, 通过加载寄生条带以及将二维结构变为三维结构, 天线的带宽相较于文献[1]得到了极大地提高, 且在水平面有小的增益变化, 但其结构过于复杂不易加工. 同轴共线(COCO)天线^[3]因其结构简单, 且可通过组阵提高增益, 但依然存在带宽窄的问

题. 微带贴片天线^[4-6]虽然结构简单, 但同样带宽很窄. 在文献[4]中, 提出了一种具有短路过孔和耦合圆环的圆形贴片天线, 通过合并3种谐振模式提高天线的带宽, 但其增益较低. 在文献[5]中, 通过应用耦合馈电及寄生贴片, 较好地拓展了贴片天线的阻抗带宽, 但其馈电方式复杂. 在文献[6]中, 提出一种由矩形贴片和微带线构成的阵列, 通过在上下相邻导体之间引入等效为容性负载的间隙, 从而提高天线的带宽. 平面缝隙天线因其简单易加工的特性受到广泛的研究^[7-10]. 在文献[7]中, 天线虽然结构简单且实现了高增益

收稿日期: 2021-06-30

作者简介: 刘宇峰(1986—), 男, 讲师, 博士生, 主要从事天线设计等研究. E-mail: liuyufeng@sxu.edu.cn

的全向辐射,但带宽较窄,不能满足更多设备同时工作的要求.在文献[8]中,天线通过蚀刻缝隙来激发多种谐振模式,实现在高频部分带宽的展宽.在文献[9]中,通过在接地板蚀刻缝隙,不仅改善了天线的阻抗匹配,同时拓宽了高频部分的带宽,但其增益较低.在文献[10]中,通过加载寄生缝隙,在低频段产生了额外的谐振,天线的带宽拓展了近 10 倍,但其馈电结构复杂.理想的全向天线应具有简单的结构,易于组阵,高定向性,较宽的带宽,同时有较低的增益变化以保证稳定的全向辐射性能,然而现存的设计几乎无法同时满足这些要求.

本文所提出的全向阵列天线,基于带状线结构,设计简单.通过在两侧金属板上蚀刻一系列加载双 Y 枝节的环形缝隙,并且通过 SMA 连接中心导带对其进行串行馈电,使天线激发了新的谐振模式,获得了较宽的带宽.结合 GA 算法对天线的结构参数进行优化.基于优化结构参数设计并加工制作了一款工作于 5.8 GHz 全向平面缝隙阵列,验证了该设计的有效性.

1 天线的结构与设计

图 1 为本文所提出天线的结构,天线是由宽度 $W_c=2.16$ mm 的中心导带和两侧接地板组成的 $50\ \Omega$ 带状线.金属地板间填充厚度 $h=3$ mm 的聚四氟乙烯,相对介电常数 $\epsilon_r=2.55$ 、损耗正切角 $\tan\delta=0.002$.在带状线的一端 AA' 通过同轴进行馈电,端口距离第一个辐射缝隙 $L_f=20$ mm,带状线另一端 BB' 为终端开路.两侧金属接地板上等间距蚀刻 8 个加载双 Y 形枝节的环形缝隙.

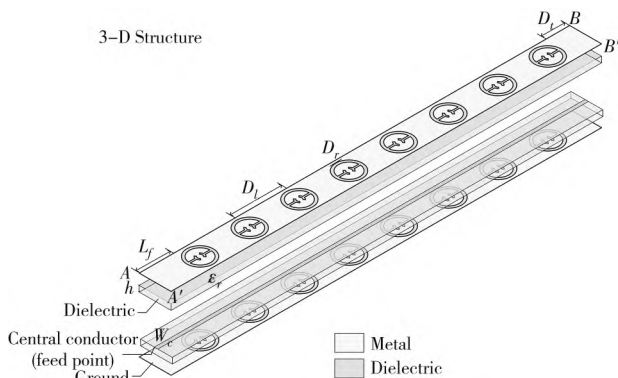
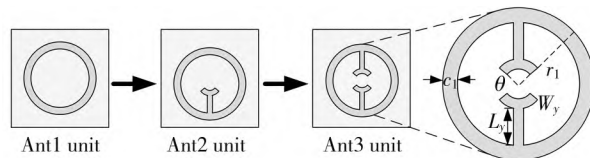


图 1 天线的结构

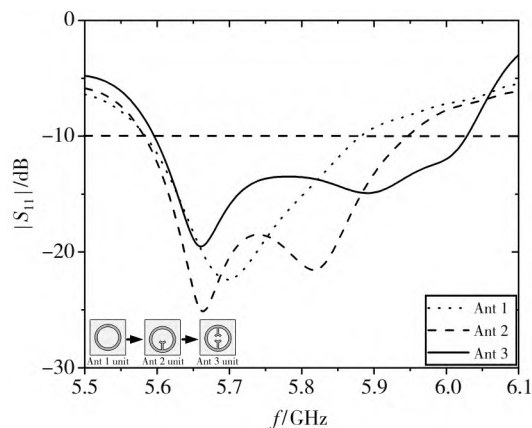
Fig. 1 Configuration of the antenna

图 2 为所采用缝隙单元的设计过程及其对应天线的仿真 $|S_{11}|$. 天线 1 所采用的缝隙单元为单圆环,相对带宽为 5% (5.59 GHz~5.88 GHz),

如图 2(b) 所示.在不改变单元尺寸的前提下,通过在圆环缝隙单元中加载一个 Y 形的缝隙, Y 形缝隙由竖直长度 L_y 和弧形部分(与圆环同心)组成,对向角度 θ . 天线 2 在高频产生新的谐振,相对带宽增加为 5.8% (5.59 GHz~5.93 GHz).



(a) 天线单元的设计过程



(b) 3 种单元对应天线的 $|S_{11}|$

图 2 缝隙单元

Fig. 2 Slot unit

在缝隙单元图 2 的基础上,将 Y 形缝隙沿圆环单元中心对称放置,即构成本文所采用的缝隙单元 3,天线的相对带宽提升至 7.41% (5.60 GHz~6.03 GHz),工作带宽进一步拓宽.

图 3 为 3 种单元在 5.8 GHz 处的瞬时电流分布,在与接地平面垂直的电场激励下,缝隙单元产生谐振.如图 3(a) 所示,当辐射单元仅为圆环缝隙时,电流主要集中在沿圆周方向,引入一个 Y 形缝隙后,沿电流流动的方向增加了新的同相分布电流,因此在高频处引入谐振.当引入一对中心对称的 Y 形缝隙后,如图 3(c) 所示,延长了同相分布电流的路径,使其分布更均匀.同时在高频引入新的谐振,因此带宽明显增强.

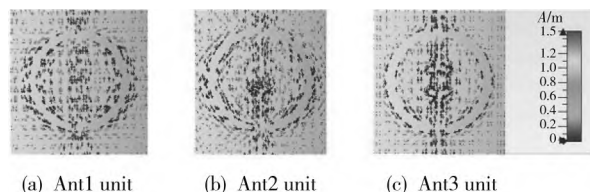


图 3 3 种单元在 5.8 GHz 处的电流分布

Fig. 3 Current distribution of three slots at 5.8 GHz

图 4 为所设计天线在 5.8 GHz 处的瞬时电流

分布图, 电流从同轴馈电端流入, 沿着带状线按照箭头方向流动. 电磁能量从中心导带耦合至 8 对等间距辐射缝隙, 最终同相叠加, 从而实现高增益的全向辐射.

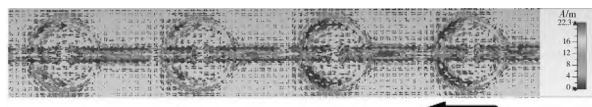


图 4 5.8 GHz 处表面电流

Fig. 4 Surface current of the antenna at 5.8 GHz

2 参数分析及优化

2.1 主要参数分析

为了分析天线结构参数对谐振频率及带宽的影响, 对部分重要参数进行分析. 图 5 为圆环缝隙的半径 r_1 对 $|S_{11}|$ 的影响. 随着 r_1 的增大, 谐振频点向高频移动, 但过大时会导致天线带宽性能的恶化. 因此选择 $r_1 = 8.41$ mm.

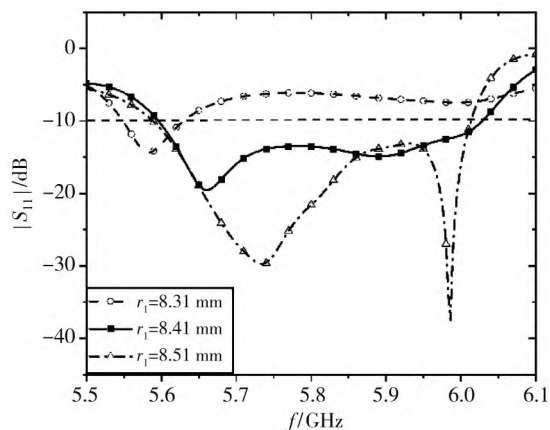
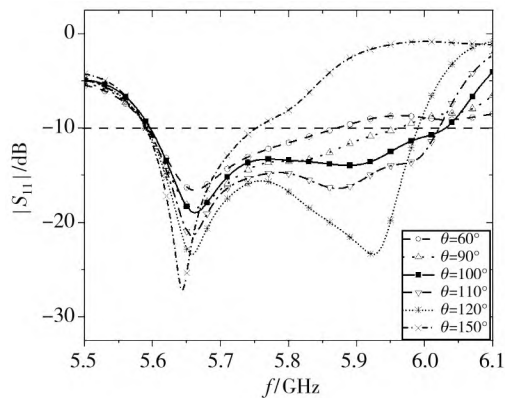


图 5 r_1 对天线 $|S_{11}|$ 参数的影响

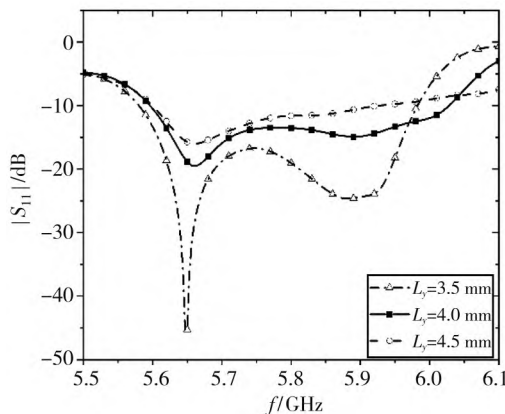
Fig. 5 Simulated $|S_{11}|$ of proposed antenna by tuning parameter r_1

Y 形缝隙的参数也会对天线的性能产生较大的影响. 如图 6(a) 所示, 经扫参分析可知, 当 $90^\circ < \theta < 120^\circ$ 时, 天线的带宽性能较好. 当 θ 过小或者过大时, 将无法激励出高频的谐振, 因此带宽性能出现恶化, 但对低频部分几乎没有影响. 当 $\theta = 100^\circ$ 时, 天线的带宽最优.

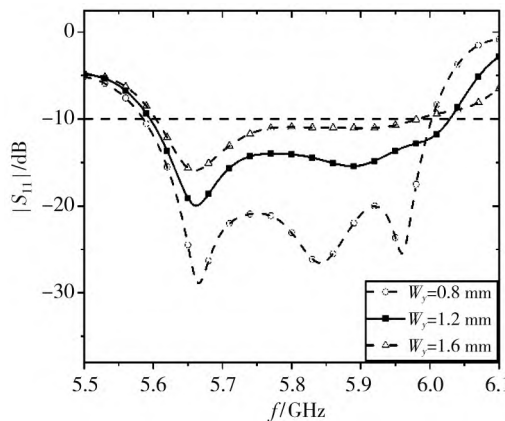
如图 6(b) 所示, 随着 L_y 的增大, 由于 Y 形缝隙靠近会出现较强的耦合, 天线阻抗匹配变差, 选择 $L_y = 4$ mm. 如图 6(c) 为 Y 形缝隙宽度 W_y 对 $|S_{11}|$ 的影响, 当 W_y 较小时, 天线的传输性能良好, 随着 W_y 的增大, 会影响在高频和低频部分的阻抗匹配, 天线的带宽变窄, 因此选择 $W_y = 1.2$ mm.



(a) θ 对 $|S_{11}|$ 参数的影响



(b) L_y 对 $|S_{11}|$ 参数的影响



(c) W_y 对 $|S_{11}|$ 参数的影响

图 6 Y 形缝隙对天线 $|S_{11}|$ 参数的影响

Fig. 6 Effects of Y-slot with different dimensions on $|S_{11}|$ parameter

2.2 优化设计

微带线在 5.8 GHz 下的工作波长可由下列公式计算得出

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{f_0 \sqrt{\epsilon_r}},$$

式中: λ_0 为自由空间波长; c 为自由空间中的光速. 使用全波电磁仿真确定了对天线性能影响较

大的 8 个参数并仿真出了较优性能的初始值作为算法的初始种群, 分别是缝隙之间的距离 D_l 、微带线上边距与缝隙之间的距离 D_t 、微带线水平边距与缝隙之间的距离 D_r 、缝隙的半径 r_1 、缝隙宽度 c_1 、Y 形缝隙的长 L_y 和宽 W_y 及弧形部分的角度 θ 。为了获得最优的全向辐射性能, 采用遗传算法对天线进行优化。

遗传算法(Genetic Algorithm)是模仿自然界生物进化机制发展起来的随机全局搜索和优化方法, 是一种自适应地控制搜索过程以求得最佳解的方法。将优化的天线参数范围设置为初始值的左右各 10% 的区间, 为了减小每一代所需的求解器计算次数, 种群大小设置为 4×8 , 变异率为 60%, 随机种子设置为 1, 最大迭代次数为 30 次, 最大的求解次数约为 497 次。之后, 定义了算法的适应度函数

$$F = C_1 * S_{11} + C_2 * MaxGain + C_3 * Bandwidth$$

式中: F 为适应度值; S_{11} 为天线的反射系数, 设置为在带宽范围内低于 -10 dB; $MaxGain$ 为峰值增益; $Bandwidth$ 为 5.8 GHz 下 $|S_{11}| < -10$ dB 的阻抗带宽。 C_1 、 C_2 和 C_3 为权重因子, 考虑到本设计为天线带宽性能的增强, 因此将他们分别设置为 0.1、0.3 和 0.6。最终优化后的参数分别为 $D_l = 31.61$ mm(0.97λ), $D_t = 14.86$ mm(0.46λ), $D_r = 1.67$ mm(0.05λ), $r_1 = 8.41$ mm, $c_1 = 1.72$ mm, $L_y = 4$ mm, $W_y = 1.20$ mm, $\theta = 103.6^\circ$ 。

3 仿真和测试结果分析

基于遗传算法优化所确定的结构参数加工了天线的实物, 如图 7 所示。天线的长度为 273 mm, 宽度为 20.16 mm。中心导体和金属地板印刷在其中 1 块基板上, 另 1 块基板一侧只印刷金属地板, 2 块基板粘贴在一起形成天线。



图 7 天线实物

Fig. 7 Photograph of the fabricated antenna

图 8 为天线实测和仿真的 $|S_{11}|$, 可以看到, 两条曲线较为吻合。实测天线 $|S_{11}| < -10$ dB 的阻抗带宽为 5.69% (5.64 GHz~5.97 GHz)。误差可能是由于天线加工误差及 SMA 接头焊接导致天线出现阻抗匹配较差。

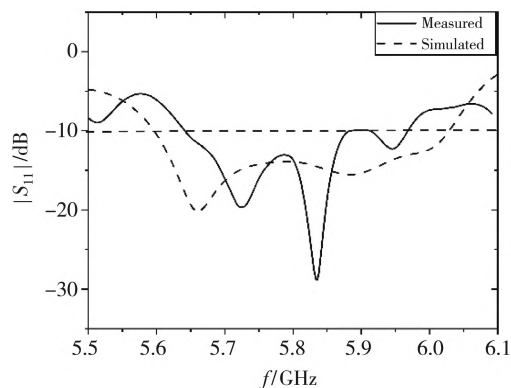


图 8 实测和仿真 $|S_{11}|$

Fig. 8 The measured and simulated $|S_{11}|$ at different frequencies

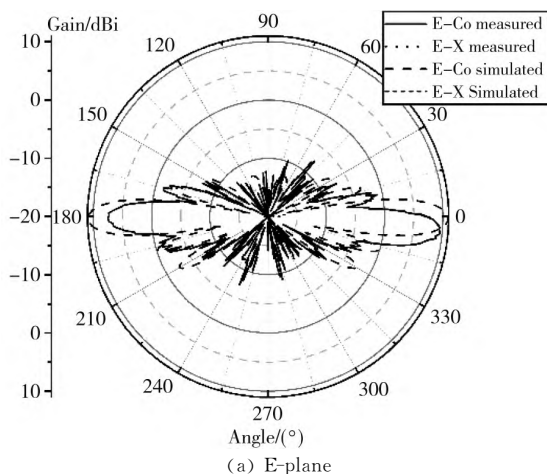
图 9 为微波暗室天线实际测试环境, 完成辐射方向图和增益的测量。



图 9 天线实际测试环境

Fig. 9 The test environment of antenna

图 10 为在 5.8 GHz 处方位角平面(H-plane)和仰角平面(E-plane)。由图 10 可以看出, 实测和仿真的方向图较为一致。天线在工作频率 5.8 GHz 处测得的最大增益为 9.44 dBi, 测得在 E-plane 的波束宽度为 10.1° , 在 H-plane 和 E-plane 的旁瓣比主瓣低 12.6 dB, 天线以线性极化辐射, 交叉极化水平低于 -15 dB。测得 E-plane 辐射方向图的主波束出现约 5° 的偏转以及未达到峰值的问题, 可能是由于两块基板在粘贴时未精确对齐, 导致了两侧的缝隙不能被同时激励, 因此, 两侧缝隙上的同相电流幅值出现较小的偏差, 从而导致上述误差。



(a) E-plane

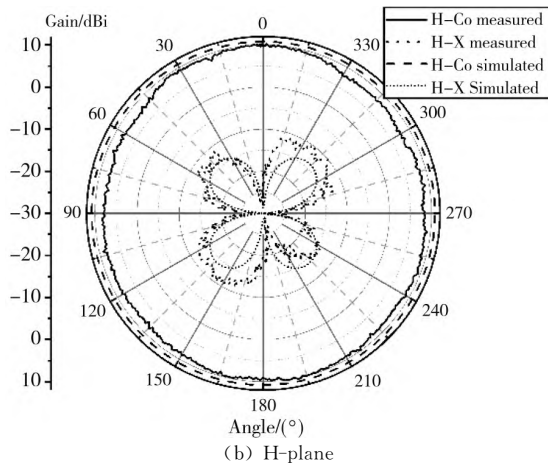


图 10 5.8 GHz 处天线的测量和仿真辐射方向图

Fig. 10 Measured and simulated radiation patterns of the antenna at 5.8 GHz

图 11 为天线的实测和仿真增益曲线, 从图 11 中可以看出, 其实测增益从 8.49 dBi 变化到 9.68 dBi, 实测与仿真结果出现了约 1.2 dBi 的误差, 这可能是由于天线加工及测试环境导致的, 但整体趋势是一致的. 天线在带宽内相邻频点的增益变化低于 0.5 dB. 结果表明, 所提出的天线在工作频带内能保持稳定的全向辐射性能.

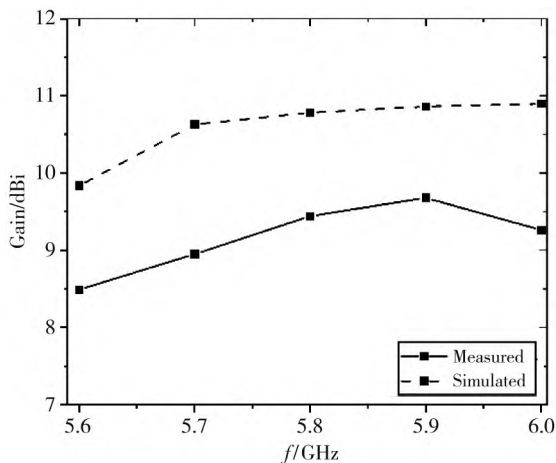


图 11 实测和仿真天线的增益

Fig. 11 Measured and simulated peak gain of proposed antenna

4 结 语

本文设计了一种新型全向环形缝隙阵列天线. 天线结构简单, 缝隙辐射单元通过中心导带串行馈电. 通过在接地板上蚀刻加载 Y 形枝节的圆环缝隙实现了带宽的增强, 并实现了在带宽范围内稳定的全向辐射. 通过 GA 对天线参数进行优化, 制作并测量了实物, 测得天线在 5.8 GHz 的工作频率下, 天线的阻抗带宽为 ($|S_{11}| < -10$ dB) 5.69% (5.64 GHz ~ 5.97 GHz), 最大增益为

9.68 dBi, 且增益变化小于 0.5 dB. 结果表明, 该天线适用于 WLAN 无线通信系统.

参考文献:

- [1] HUA Z, XI L, MA X, et al. Design and analysis of a coupling-fed printed dipole array antenna with high gain and omnidirectivity[J]. IEEE Access, 2017, PP (99): 1-1.
- [2] YU Y, JIANG X, REN W. A wideband omnidirectional antenna array with low gain variation[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2015, 15: 386-389.
- [3] ZENG X, HU Z, CHENG Q, et al. Design of a coaxial collinear array antenna with low sidelobe[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2017, 29(9): 093001.
- [4] WEN C L, CHU Q X. A bandwidth enhanced broadband patch antenna for LTE700/GSM850/GSM900 applications[C]// 2020 Cross Strait Radio Science & Wireless Technology Conference (CSRSWTC). 2020.
- [5] BRAS L, CARVALHO N B, PINHO P. Planar omnidirectional microstrip antenna array for 5 GHz ISM and UNII band[C]. Antennas & Propagation Society International Symposium. IEEE, 2013.
- [6] LEI W, WEI K, FENG J, et al. A wideband omnidirectional planar microstrip antenna for WLAN applications[J]. Electrical Design of Advanced Packaging & Systems Symposium IEEE, 2012, 1-4.
- [7] XING C, HUANG K, XU X B. A novel planar slot array antenna with omnidirectional pattern[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59 (12): 4853-4857.
- [8] SZE J Y, HSU C, HSU S C. Design of a compact dual-band annular-ring slot antenna[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2007, 6: 423-426.
- [9] LI L, ZHANG X, YIN X, et al. A compact triple-band printed monopole antenna for WLAN/WiMAX applications[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 1853-1855.
- [10] CAI Y, LI W, WEI H, et al. A wideband compact horizontally polarized omnidirectional antenna for 2G/3G/LTE[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2018, 28(5): e21256.