

一种新型宽带双频板基天线设计与实现

许拓 刘成国 丁肇宇 张经纬 何大平 吴志鹏

(湖北省射频频微波应用工程技术研究中心 湖北 武汉 430070)

摘要 研究并设计一种新型宽带双频单极子天线,工作频段为 900 MHz 和 1.8 GHz,可在以物联网为代表的自持供电传感节点等系统中应用。基于单极子天线尺寸设计原理分析的基本结果,通过对天线双臂在不同等效电长度下的辐射特性研究,开展 G 型天线的优化仿真设计和研发。利用矢量网络分析仪和 3D 天线自动测试系统得到仿真和测试吻合的结果。实测结果表明:天线的半功率波束宽度分别能够达到 73° 和 126° ,天线的反射系数小于 -10 dB 的阻抗带宽分别是 90 MHz(860 ~ 950 MHz)和 0.6 GHz(1.55 ~ 2.15 GHz),相对带宽分别是 10% 和 33.3%,不圆度分别低于 2.6 和 5.7 dB,电压驻波比均小于 2.04。该天线实现对目标频段范围内的完全覆盖,得到大的波束宽度、宽带、双频等特性,天线结构简单,易于加工,实用性强。

关键词 单极子天线 物联网 矢量网络分析仪 半功率波束宽度 阻抗带宽

中图分类号 TP3 **文献标识码** A **DOI**:10.3969/j.issn.1000-386x.2018.11.034

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A NOVEL BROADBAND DUAL-FREQUENCY PCB ANTENNA

Xu Tuo Liu Chengguo Ding Zhaoyu Zhang Jingwei He Daping Wu Zhipeng

(Hubei Engineering Research Center of RF-Microwave Technology and Application, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract A new type of broadband dual-frequency monopole antenna was investigated and designed. The working frequency range was 900 MHz and 1.8 GHz. It could be applied in a system such as a self-sustaining power sensor node represented by the Internet of Things. Based on the basic results of size design principle analysis of the monopole antenna, the optimization simulation design and development of the G-shaped antenna was carried out by studying the radiation characteristics of the antenna arms under different equivalent electrical lengths. The results of simulation and test were anastomotic by vector network analyzer and 3D antenna automatic test system. The measurement results show that the half power beam width(HPBW) of the antenna can reach 73° and 126° respectively. The impedance bandwidths of the antenna with reflection coefficient less than -10 dB are 90 MHz at frequency range from 860 MHz to 950 MHz and 0.6 GHz from 1.55 GHz to 2.15 GHz respectively. Relative bandwidth is 10% and 33.3% respectively. The roundness is lower than 2.6 dB and 5.7 dB respectively. Voltage standing wave ratio is below 2.04. The antenna achieves complete coverage in the target frequency range, and has characteristics such as large HPBW, broadband and dual-frequency. The antenna is simple in structure, easy to process and practical.

Keywords Monopole antenna Internet of Things VNA HPBW Impedance bandwidth

0 引言

宽带多频板基天线是当代信息技术应用中的一个

关键技术,在系统宽带化和多频化的应用系统中必须得到很好的解决。例如,超低功耗芯片技术的发展使以物联网为代表的无线传感器节点功耗进入微瓦(μw)量级^[1-2],这使利用周围环境中(手机、无线局域

网、FM/AM 广播信号和电视信号等)的射频无线能量为其中低功耗传感器节点的自持供电技术提供了有效选择,成为目前的热门研究课题^[3-4]。有效地收集环境电磁能量的宽带多频天线技术是需要解决的关键技术之一,用以满足天线小尺寸、重量轻、易于安装和双频或者多频覆盖等方面的应用需求^[5]。一方面,单极子天线可以大大增加天线带宽^[6-7];另一方面,为了使单极子天线能够接收到更多人为频段的能量需要研发多频单极子天线^[8],由于实现困难,所以成为无线能量收集天线研究的一个重要问题。文献[9]提出了一种结构复杂的三频天线,而在设计频点 900 MHz 和 1 900 MHz 的带宽和增益均不高,文献[10]中设计的双频天线得到的天线实测性能在低频 900 MHz 也不理想。目前,能量收集系统中整流天线大多追求结构复杂、多频等指标,忽略了天线本身性能,设计的天线往往结构复杂、实现了多频特性,而带宽和增益等性能大大降低。

针对我国固定使用的 900 MHz 和 1.8 GHz 成熟商用通信频段,开展了新型双频板基 G 型^[11]天线结构的研究和设计,通过 HFSS 软件仿真、优化以及天线的制作和测试,实现了双频点的高带宽、大波束宽度的较高增益的良好天线辐射特性。在物联网时代背景下,对该天线应用于射频能量收集系统提供一种选择。

1 原理分析和设计

1.1 天线结构

为更有利于射频能量的接收,需要具有多频功能、增加电磁波接收面积和比较大的半功率波束宽度。目前扩展微带结构天线带宽的方法主要是加厚介质基板或采用介电常数较小基板^[12]、电磁耦合、增加阻抗匹配网络和开槽技术等^[13]。本文选用 1/4 波长的单极子天线的机制设计天线,为满足相对带宽和板基印刷等要求,采用图 1 所示的 G 型结构,两个天线臂实现双频工作,并且两臂之间相互耦合,使得谐振频率相互靠近,有利于增大工作频点带宽;同时,天线臂的有效电长度辐射方向的改变,半功率波束宽度也随之变化。图中标明了天线结构的尺寸参数 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_5 、 L_6 、 H_1 、 H_2 和 W_f 。 L_e 和 L_g 除了表示板基天线的尺寸之外, L_g 也是其微带馈线的长度。基板采用广泛应用的 FR4,其介电常数 ϵ_r 为 4.4,正切损耗为 0.02,基板厚度为 1.6 mm。

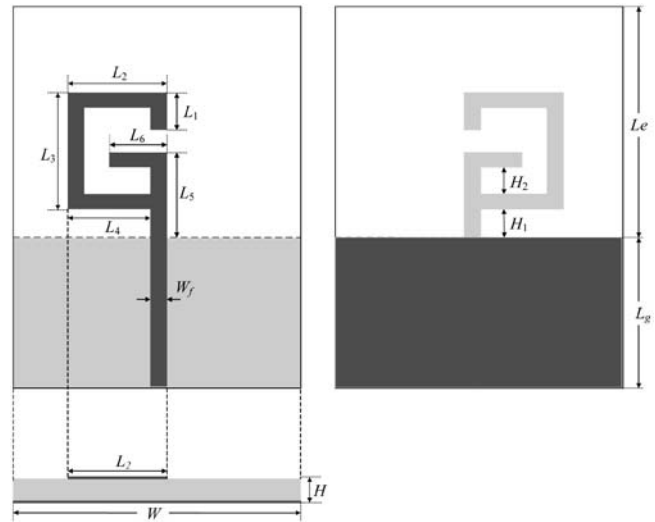


图 1 G 形天线的结构和参数

所设计的 G 型天线工作于 900 MHz 和 1.8 GHz 两个频段,主要吸收空间环境中移动通信 GSM (Global System for Mobile Communication) 通用频段同时也是目前窄带物联网 (Narrow-Band Internet of Things, NB-IoT) 所采用的主要频段。电磁波在媒质中传播的波长由公式 $\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$ 确定。其中在自由空间中传播的波长为 λ_0 。对于 900 MHz 的中心频率,1/4 波长单极子天线的长度介于 39.75 ~ 83.25 mm 之间;对于 1.8 GHz 的中心频率,1/4 波长单极子天线的长度介于 19.88 ~ 41.75 mm 之间。两个频率谐振点 900 MHz 和 1.8 GHz 对应的单极子天线等效电长度分别为臂 1: $L_1 + L_2 + L_3 + L_4 - 3 \times W_f$, 臂 2: $H_2 + L_6$ 。表 1 给出了两个谐振频率对应的电长度尺寸的理论值范围。实际天线的电长度尺寸在理论范围内调整获取最佳的阻抗匹配和辐射特性。

表 1 天线臂长理论值

频率	参数项	理论 1/4 波长/mm
900 MHz	$L_1 + L_2 + L_3 + L_4 - 3 \times W_f$	39.75 ~ 83.25
1.8 GHz	$H_2 + L_6$	19.88 ~ 41.75

1.2 微带馈线

微带线是集成电路普遍使用的平面传输线,可以很好地作为板基微波天线的馈线系统。它附着在介质基板上,良好地印刷在一起。使用中为了满足匹配的要求,要设计微带线的上述参数得到给定特征阻抗,如 50 欧姆的微带线。

文献[14]给出了微带线厚度为 t 时,微带线宽 w 与微带线阻抗和有效介电常数的关系近似值公式:

$$\frac{w}{h} = \begin{cases} \frac{8}{[\exp(A) - 2\exp(-A)]} & \frac{w}{h} \leq 2 \\ \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\} & \frac{w}{h} \geq 2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $A = \frac{\pi}{\eta_0} \sqrt{2(\epsilon_r + 1)} Z + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)$;

$B = \frac{\pi\eta_0}{2\sqrt{\epsilon_r}Z}, \eta_0 = 376.73 \Omega$ 。

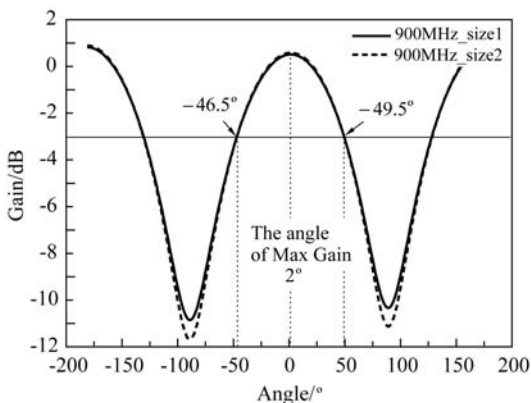
设计中选用了 FR4 板材,基于用标准的 50 欧姆微带线馈电的一般要求,运用微带线特征阻抗的近似计算公式计算得到基本的线宽为 $W_f = 3.05 \text{ mm}$ 。在仿真时再进行参数优化,将它和天线构成的单端口网络的输入端口阻抗匹配到 50 欧姆。

2 参数优化和性能仿真

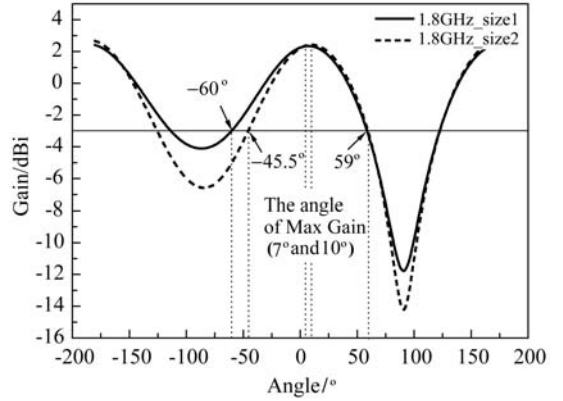
2.1 半功率波束宽度

通过仿真设计对该天线参数进行优化设计。以频率 1.8 GHz 为中心,在 0.1 ~ 2.5 GHz 的范围内以 10 MHz 步进进行扫描计算。通过改变各臂长度将天线工作频点匹配到 900 MHz 和 1.8 GHz,在表 1 的尺寸内调整臂长对应各参数,实现阻抗匹配。

将天线的等效电长度在辐射方向的垂直方向上拉伸,即减小 L_3 ,增大 L_4 ,得到更大的半功率波束宽度并实现良好的天线辐射特性。比较了结构尺寸 $L_1 + L_2 + L_3 + L_4 - 3 \times W_f$ 和 $H_2 + L_6$ 的值,基本相等。比较了仿真结果中的方向图,发现半功率波束宽度在低频情况下几乎一样,高频时波束宽度有明显差别。在高频情况下天线半功率波数宽度大了约 15° 的结构尺寸。图 2 给出了仿真的两种尺寸下,半功率波束宽度在低频和高频下的曲线平面方向图仿真结果的对比图,并标明了 15° 差别的相关数据。



(a) 900 MHz 半功率波束宽度



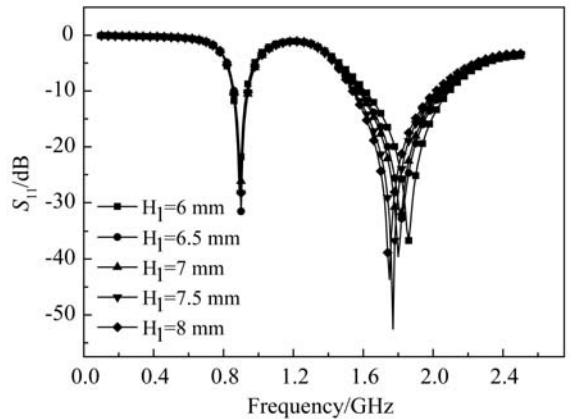
(b) 1.8 GHz 半功率波束宽度

图 2 两种尺寸的半功率波束宽度

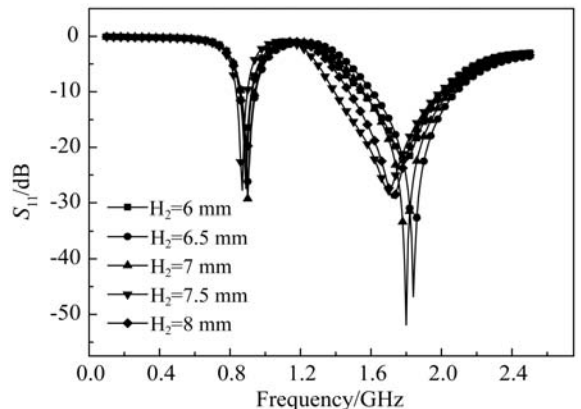
2.2 天线尺寸和 S 参数

通过改变天线结构和微带馈线的尺寸,对半功率波束宽度大的天线尺寸作了研究。得到了图 3 所示的天线回波损耗随频率变化曲线。

研究表明,改变 L_1, L_4, L_3 可以调整低频点偏移,改变 H_2 和 L_6 可以调整高频点偏移,改变 H_1, L_6, L_1 对两个频点偏移都会有影响。双臂之间存在互耦作用, H_1 和 L_g 对天线高频谐振点影响比较大, H_2 主要影响高频谐振点频点偏移量。在改变参数大小时,会影响两臂电长度和它们之间的互耦效果,从而影响工作频点的偏移量和天线带宽。



(a) 改变参数 H_1



(b) 改变参数 H_2

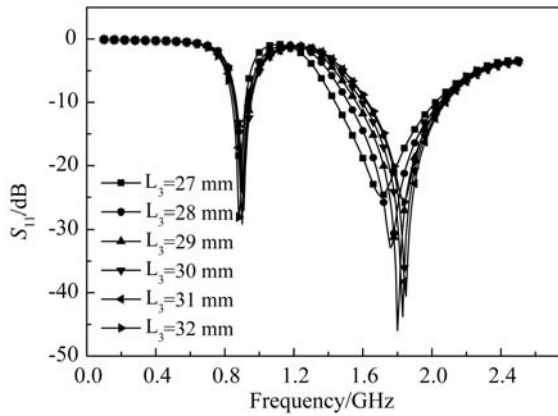
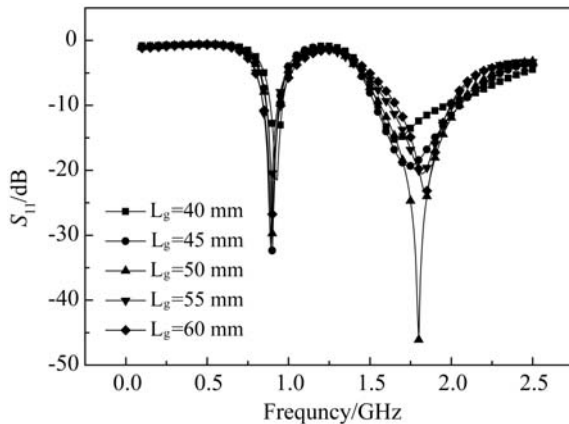
(c) 改变参数 L_3 (d) 改变参数 L_e

图3 改变天线部分参数回波损耗曲线图

图3给出的是改变 H_1 、 H_2 、 L_3 和 L_e 的 S_{11} 曲线图,反映了上述的变化情况。图中显示随着各参数的变化,低频点 900 MHz 的偏移量不大,并且低频点处的 S_{11} 值差距约为 5 dB 以内。而高频点 1.8 GHz 的偏移量随着参数变化比较大,且 S_{11} 值最大能差 20 dB 左右。最终,通过扫参优化得到谐振频点处于 900 MHz 和 1.8 GHz 的良好阻抗匹配结果,表 2 是优化后对应的参数。表中结果表明 $L_1 + L_2 + L_3 + L_4 - 3 \times W_f$ 和 $H_2 + L_6$ 的值,分别为 73.4 和 21.33 mm,均在表 1 的理论范围内。

表2 各优化参数设置

天线结构参数	优化值/mm	天线结构参数	优化值/mm
L_1	11.5	L_6	14.43
L_2	24.17	W_f	3.98
L_3	29.48	L_g	50
L_4	20.19	L_e	60
H_1	6.7	H	1.6
H_2	6.9	W	72.5
L_5	21.95	/	/

3 测试结果与分析讨论

本文为研制出设计的板基天线,将设计的天线输出 PCB 版图,使用红外激光直刻技术直接加工成型,得到了图 4 天线实物。该图中研制的天线已焊接上了标准的 50 欧姆 SMA 转接头,在微波暗室中连接在了一套 3D 天线辐射性能的全自动测试系统上。

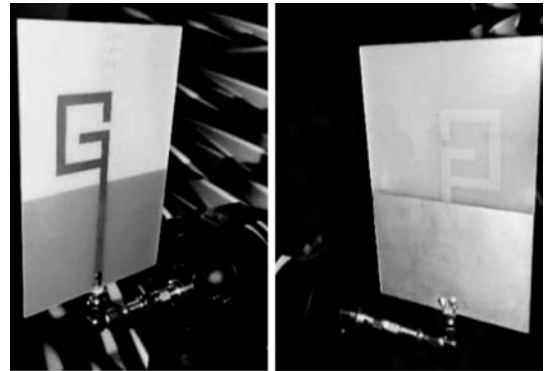


图4 天线实物及测试安装图

测试工作在湖北省射频与微波应用技术工程技术研究中心开展,天线的 S 参数使用 Keysight PNA 5427A 测得。辐射性能使用 Keysight PNA 5427A 和一套 3D 天线性能全自动测试系统在微波暗室里测得。

图 5 给出了仿真与实测的天线回波损耗对比图,图中结果表明,仿真结果与实测结果吻合,只在高频点 1.8 GHz 的回波损耗值相差接近 30 dB,但是频点几乎没有偏移。仿真和实测的相对带宽也差不多。提取实测 S_{11} 值,反射系数小于 -10 dB 的阻抗带宽分别是:900 MHz 为 90 MHz(860 ~ 950 MHz),1.8 GHz 为 600 MHz(1.55 ~ 2.15 GHz),相对带宽分别为 10% 和 33.3%。

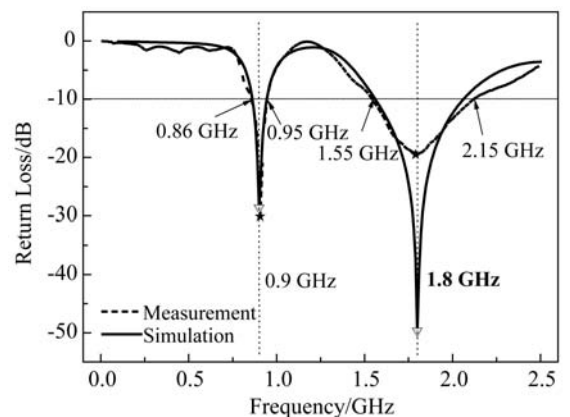
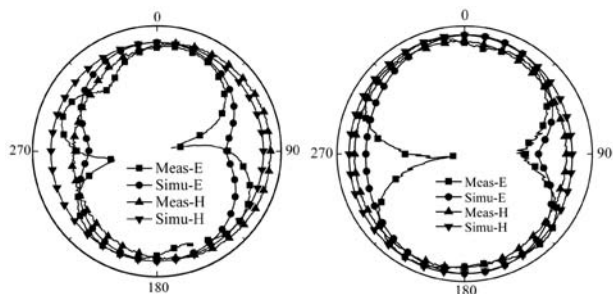
图5 实测与仿真 S_{11} 对比图

图 6 为天线在 900 MHz 和 1.8 GHz 时 E 面和 H 面的实测与仿真对比方向图,一方面表明该天线为线天线,主极化性能良好;另一方面,天线的方向图有很好的全向效果,更有利于能量收集的应用。由实测可

得天线的半功率波束宽度分别能够达到 73° 和 126° , 低频点稍微低于仿真结果 90° , 高频点略高于仿真结果 120° ; 天线在 900 MHz 和 1.8 GHz 的不圆度分别不高于 2.6 dB 和 5.7 dB。



(a) 900 MHz 方向图 (b) 1.8 GHz 方向图

图 6 仿真与实测方向图

图 7 为在微波暗室中测得的天线增益与仿真增益对比图, 实测结果表明, 在 900 MHz 的增益约为 0.7 dBi, 在 1.8 GHz 的增益约为 2.6 dBi; 在低频段 900 MHz 左右仿真增益比实测增益大, 高频段实测增益比仿真增益大。由于发射天线在宽频带范围的精度以及实际测量设备的安装中会产生固有误差, 实测结果与仿真结果会存在一定误差。

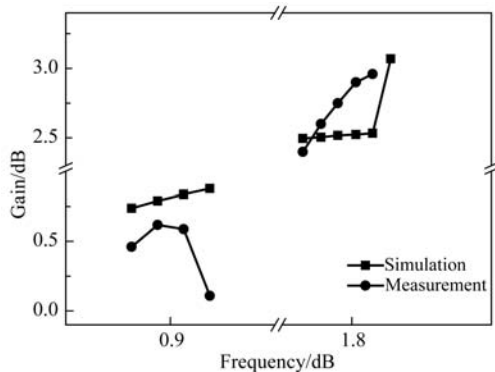


图 7 仿真与实测天线增益

4 结 语

本文设计了一种应用于无线能量收集系统的新型宽带双频板基单极子天线, 通过对天线研究、仿真优化, 得到了设计结果, 并研制出天线实物。对天线进行性能测试对比, 最终的测试结果表明, 该 G 形天线本身具有良好的辐射特性, 在实现天线双频工作和保证天线增益尽可能大的情况下, 实现了较大的波束宽度, 大大增加了天线在双频点的阻抗带宽, 完全覆盖了 GSM 上行和下行频段以及 NB-IoT 网络所在的两个主要频段的带宽范围, 理论上可以应用于射频能量收集系统中整流天线。对于天线在实际系统应用中的性能指标还需要进一步测试研究。

参 考 文 献

- [1] Hanson S, Seok M, Lin Y S, et al. A Low-Voltage Processor for Sensing Applications With Picowatt Standby Mode [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(4): 1145 - 1155.
- [2] élodie Morin, Maman M, Guizzetti R, et al. Comparison of the Device Lifetime in Wireless Networks for the Internet of Things [J]. IEEE Access, 2017, 5(99): 7097 - 7114.
- [3] Lu X, Wang P, Niyato D, et al. Wireless Networks With RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 17(2): 757 - 789.
- [4] Shrestha S, Noh S K, Choi D Y. Comparative Study of Antenna Designs for RF Energy Harvesting [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2013, 2013(10): 188 - 192.
- [5] Liu W C, Wu C M. Dual-band CPW-fed G-shaped monopole antenna for 2.4/5GHz WLAN application [J]. Piers Online, 2007, 3(7): 1114 - 1118.
- [6] Roy B, Bhattacharya A, Karmakar R, et al. A compact wideband monopole antenna designed for wireless applications [C]//2016 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC). IEEE, 2017: 1 - 4.
- [7] Leino M K, Partanen H, Lindvall N, et al. Wideband monopole antenna for RF power scavenger [C]//IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & Usnc/ursi National Radio Science Meeting. IEEE, 2016: 1789 - 1790.
- [8] Bakkali A, Pelegri-Sebastian J, Sogorb T, et al. A Dual-Band Antenna for RF Energy Harvesting Systems in Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Sensors, 2016, 2016 (Article ID 5725836): 1 - 8.
- [9] Pham B L, Pham A V. Triple bands antenna and high efficiency rectifier design for RF energy harvesting at 900, 1900 and 2400 MHz [C]//2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT). IEEE, 2014: 1 - 3.
- [10] Ho D K, Kharrat I, Ngo V D, et al. Dual-band rectenna for ambient RF energy harvesting at GSM 900 MHz and 1800 MHz [C]//IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies. IEEE, 2017: 306 - 310.
- [11] Xin G L, Xu J P. Wideband miniature G-shaped antenna for dual-band WLAN applications [J]. Electronics Letters, 2007, 43(24): 1330 - 1332.
- [12] 郑庚琪, 孙保华. 新型宽带小型化微带天线 [J]. 西安电子科技大学学报, 2017, 44(4): 47 - 50.
- [13] 房国志, 侯瑞强, 张玉成. 超宽带天线的一种设计方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2018, 45(1): 83 - 87.
- [14] Hammerstad E O. Equations for Microstrip Circuit Design [C]//1975 5th European Microwave Conference. IEEE, 2007: 268 - 272.