

文章编号: 2095-4980(2020)02-0241-06

## 一种 ISM 频段半切共面波导可植入天线

丁宇星<sup>1a</sup>, 赵瞬民<sup>2</sup>, 李山东<sup>1b</sup>, 宗卫华<sup>\*1a</sup>

(1.青岛大学 a.电子信息学院; b.物理学院, 山东 青岛 266071; 2.南京航空航天大学 航天学院, 南京 江苏 211100)

**摘要:** 提出一种以柔性材料为衬底的新型可植入天线, 天线初始结构为对称状共面波导天线, 对此天线在对称面进行切半得到半切共面波导天线。采用 HFSS 在单层人体模型中对半切天线进行设计与分析, 仿真结果表明天线在不同人体组织中会产生频率偏移, 但在皮肤、肌肉、小肠中均能覆盖工业、科学和医疗频段(ISM)。仿真结果还显示天线在改变衬底厚度的情况下仍具有宽的带宽。对天线进行加工, 采用猪肉馅和果冻状模拟皮肤分别对天线进行测试, 其 $|S_{11}| < -10$  dB 的带宽分别为 1.91~2.65 GHz 与 2.19~2.79 GHz, 天线在 2 种环境中的测试带宽均能覆盖 ISM 频段, 天线尺寸为 6 mm × 13.5 mm × 24 mm。将天线与圆柱体共形, 在肉馅中测试带宽为 2.26~3.11 GHz, 与目前已有天线相比, 本文天线具有尺寸小、质量轻、带宽宽的特性, 可应用于胶囊内视镜、无线心脏起搏器等可植入医疗器件中。

**关键词:** 共面波导天线; 柔性天线; 可植入天线; 工业、科学和医疗频段

**中图分类号:** TN914.42

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2018226

## A half-cut CPW-fed implantable antenna operating at ISM band

DING Yuxing<sup>1a</sup>, ZHAO Shunmin<sup>2</sup>, LI Shandong<sup>1b</sup>, ZONG Weihua<sup>\*1a</sup>

(1a.School of Electronics and Information; 1b.College of Physics, Qingdao University, Qingdao Shandong 266071, China; 2.College of Aerospace, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 211100, China)

**Abstract:** A novel flexible implantable antenna is proposed. The antenna is a half cutting of a Coplanar Waveguide(CPW)-fed antenna with symmetric geometry. The half-cut antenna is optimized and analyzed in a single-layered body phantom by using HFSS. Simulation shows that there are frequency bandwidth shifts when the body phantom is filled with different tissues of muscle, small intestine, and stomach, respectively. The antenna bandwidth covers Industrial, Scientific, and Medical(ISM) band in the case of skin, muscle and small intestine. Simulation also shows that the antenna bandwidth has little change with the varying of substrate thickness. Measurements are done by arranging the antenna in meat mince and skin-mimicking gel. For the two cases, the measured  $|S_{11}| < -10$  dB bandwidth of the proposed antenna is 1.91–2.65 GHz and 2.19–2.79 GHz covering ISM band, respectively. The proposed antenna has a small size of 6 mm×13.5 mm×24 μm. The proposed antenna is also investigated with a conformal structure adhering to a cylinder. The measured bandwidth of the conformal antenna is 2.26–3.11 GHz. Compared with published literatures, the antenna has advantages of low profile, light weight and wide bandwidth. The proposed antenna can be applied in wireless implantable medical devices, such as capsule endoscope, wireless cardiac pacemaker etc.

**Keywords:** Coplanar Waveguide antenna; flexible antenna; implantable antenna; Industrial, Scientific, and Medical band

近几年, 具有无线通信功能的可植入医疗器件在医疗领域应用广泛, 其中包括胶囊内视镜、无线心脏起搏器、血糖监测仪、颅内压监测仪等。随着智慧医疗与移动医疗的发展, 对可植入医疗器件的需求会越来越多。天线是

收稿日期: 2018-09-17; 修回日期: 2019-01-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61501277; 11674187)

作者简介: 丁宇星(1994-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为天线设计。email:389185304@qq.com

\*通信作者: 宗卫华 email:weihuazong@126.com

这些器件的重要部件,用来实现体内外无线信号的传输。为减少器件植入人体产生的不适感,要求天线以及其他部件尺寸小,质量轻;同时为保证天线在体型与肥胖程度不同人体内的频率稳定特性,天线的带宽需尽可能宽。天线的小型化与宽带化是可植入天线需要解决的难点问题。

可植入医疗器件可以采用 IEEE 802.15.6 标准的人体区域网(Body Area Network, BAN)工作频段,包括超宽带频段(Ultra-Wideband, UWB: 3.1~10.6 GHz),工业科学与医学频段(ISM: 2.4~2.483 5 GHz)、医疗植入通信服务频段(Medical Implant Communication Services, MICS: 402~405 MHz),以及人体通信(Human Body Communication, HBC: 10~50 MHz<sup>[1]</sup>)。目前可植入天线的研究主要包括 ISM 频段<sup>[2-6]</sup>、MICS 频段<sup>[7-11]</sup>、UWB 频段<sup>[12-13]</sup>以及多频段天线设计<sup>[14-16]</sup>。实现天线小型化的技术主要包括弯折天线成迂回或螺旋形状<sup>[2-3,6-7,9-11,16]</sup>、采用多层金属堆叠结构<sup>[4-5]</sup>以及在贴片上开缝隙<sup>[2-3]</sup>等。天线衬底材料从厚薄与柔性角度可以分为硬质与柔性 2 种,硬质材料的厚度一般为 0.5~1.6 mm(如 Rogers, Taconic, FR-4 等),天线体积较大,质量较重<sup>[2-5,8-9,12,14-16]</sup>;柔性材料的厚度一般为几十至一百多微米,具有体积小、质量轻的优点<sup>[6,10-11,13]</sup>。

本文针对 ISM 频段设计宽带可植入天线,天线衬底采用柔性材料聚酰亚胺,天线类型采用共面波导(CPW)。CPW 天线在 UWB 天线设计中应用广泛,有研究显示具有对称结构的 UWB CPW 天线(以及微带天线)切半后得到的半切天线仍能够覆盖 UWB 频段<sup>[17-19]</sup>。本文将半切技术应用到可植入天线设计中,提出一种新型具有对称结构的 CPW 天线。将其切半,得到新的半切 CPW 天线,天线尺寸减半但保持宽带特性。采用 Ansys HFSS 软件设计天线,仿真结果显示,半切 CPW 天线在填充皮肤的模拟人体中覆盖 ISM 频段,并且在肌肉和小肠中也覆盖 ISM 频段。仿真结果还显示,天线频带在改变衬底厚度的情况下仍具有宽的带宽,覆盖 ISM 频段。

为验证天线的性能,需要将天线放在接近人体的环境中进行测试。采用动物进行活体实验比较精确,但其操作复杂(涉及麻醉手术),价格较贵。目前天线设计领域大多采用体外实验,将天线放置于猪肉馅或肉块里,简化测试环境,这种方法价格低廉,易于操作,并且测试的天线频率特性具有参考价值<sup>[2,6,7,13-15]</sup>。还可以采用去离子水、盐、糖、甘油、琼脂、乙二醇丁醚等多种化学物质混合制作液态或果冻状模拟人体皮肤、肌肉等组织<sup>[3,5,8,16]</sup>,这种模拟组织接近人体组织的介质参数,且不易变质,易于储存,价格低廉,方便测试。本文分别采用猪肉馅和果冻状模拟皮肤来测试天线,测试结果表明,在 2 种测试环境中本文提出的天线均能覆盖 ISM 频段。

## 1 天线结构与性能仿真

### 1.1 天线结构与仿真环境

本文提出的天线结构如图 1 所示,图 1(a)为具有对称结构的 CPW 天线,将此天线沿着  $yo$  面切割得到的半切 CPW 天线如图 1(b)所示。天线衬底采用柔性材料聚酰亚胺,其相对介电常数  $\epsilon_r$  为 3,介质损耗角正切为 0.02,厚度  $h$  为 24  $\mu\text{m}$ 。可植入天线放置于人体内部工作,其特性与自由空间不同,天线设计时需要考虑人体对天线的影响。大多文献采用长方体内部填充一种组织来模拟人体<sup>[3-5,9-10,15]</sup>,这种方法建模简单,计算时间短,得到的天线  $S$  参数与采用商业软件复杂人体模型结果基本吻合。由于体外测试一般采用一种人体组织或其模拟物(如皮肤、肌肉),用单层人体模型仿真更接近测试环境,方便进行比较。本文采用 HFSS 仿真设计天线,人体模型采用边长为 100 mm 的立方体内部填充一种人体组织,天线放置于立方体中心位置(如图 2)。天线设计阶段人体组织材料采用皮肤,在 1.2 节将会对人体模型中填充不同人体组织材料时天线的频率特性进行讨论分析。表 1 为皮肤环境中优化的天线尺寸,表 2 为 2.45 GHz 时的几种人体组织的介质参数<sup>[20]</sup>。

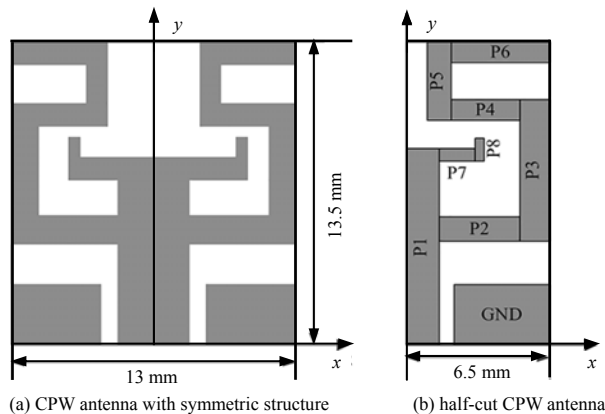


Fig.1 Antenna configuration  
图 1 天线结构示意图

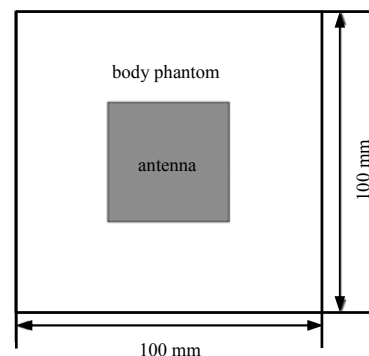


Fig.2 Antenna in body phantom  
图 2 模拟人体环境与天线

表 1 天线尺寸

Table 1 Antenna dimensions			
antenna rectangular unit	size(x,y) /mm	antenna rectangular unit	size(x,y) /mm
P1	(0.8,7.95)	P5	(1,4)
P2	(4.7,1)	P6	(5,1)
P3	(1,6)	P7	(1.8,0.5)
P4	(4,1)	P8	(0.5,1)
GND	(5.1,3.5)		

表 2 2.45 GHz 人体组织的介电参数

Table 2 Dielectric constants of different human tissues at 2.45 GHz		
tissue	$\epsilon_r$	$\sigma/(S\cdot m^{-1})$
skin(dry)	38.00	1.46
muscle	52.73	1.74
small intestine	54.42	3.17
stomach	62.16	2.21

1.2 天线性能分析

图 3 为对称结构的 CPW 天线与半切 CPW 天线的反射系数与阻抗的仿真曲线, 人体组织设置为皮肤。由图 3(a)可见, 2 种天线在 2.45 GHz 附近有相近的谐振频率, 即 2 种天线的电流路径长度基本相同。图 4 为 2 种天线在 2.45 GHz 的电流分布图, 由图 4(a)可见, 对称结构的 CPW 天线的电流分布关于  $yo$ z 面对称, 图 4(a)左半部分的电流分布与图 4(b)半切 CPW 天线的电流分布基本一致, 说明将对称结构的 CPW 天线切半后电流分布保持不变, 因此谐振频率也保持不变。图 3(b)给出 2 种天线的阻抗分布曲线, 由图可见半切 CPW 天线的阻抗更接近于  $50 \Omega$ , 因此半切 CPW 天线比对称 CPW 天线具有更宽的带宽。

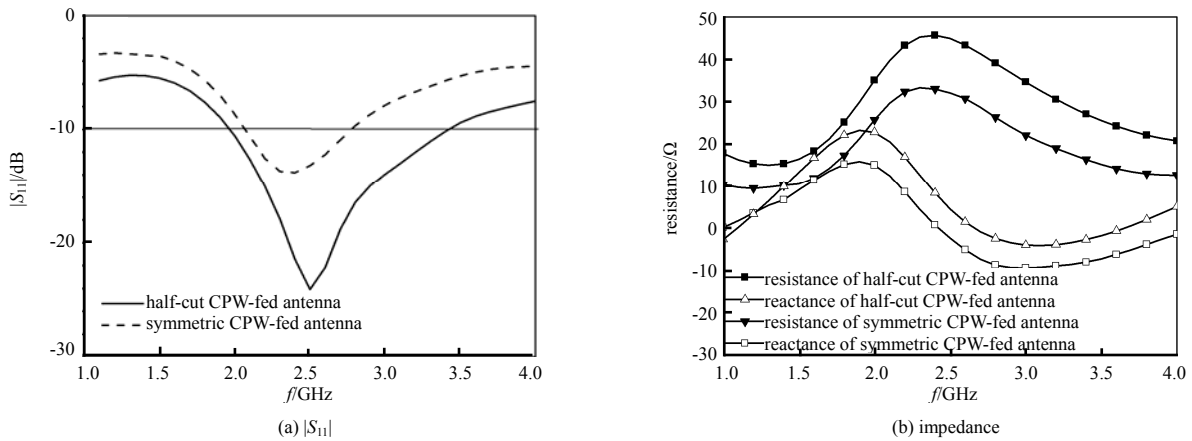


Fig.3 Simulation of half-cut CPW antenna in skin phantom

图 3 皮肤环境中的半切 CPW 天线仿真曲线

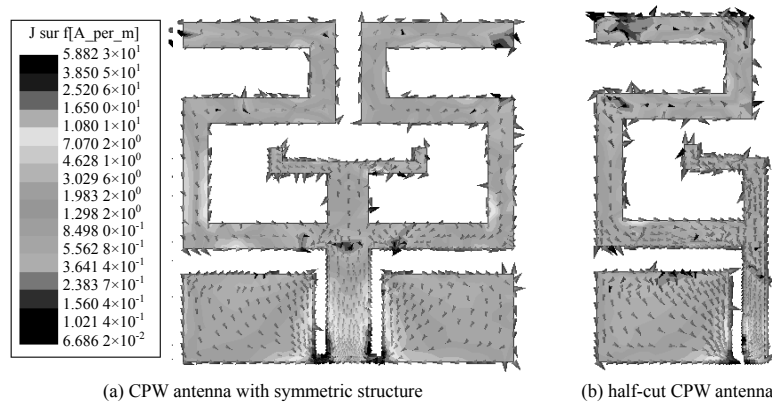


Fig.4 Current distribution at 2.45 GHz

图 4 2.45 GHz 天线电流分布图

图 5 为半切 CPW 天线在皮肤中的  $|S_{11}|$  曲线随天线衬底厚度  $h$  变化的曲线图, 从图中可见, 谐振频率随衬底厚度增大而稍微右移, 但天线的  $-10$  dB 仍可以覆盖 ISM 频段。图 6 为半切 CPW 天线在不同人体组织中的  $|S_{11}|$  曲线图, 其中人体各组织的介质参数见表 2。

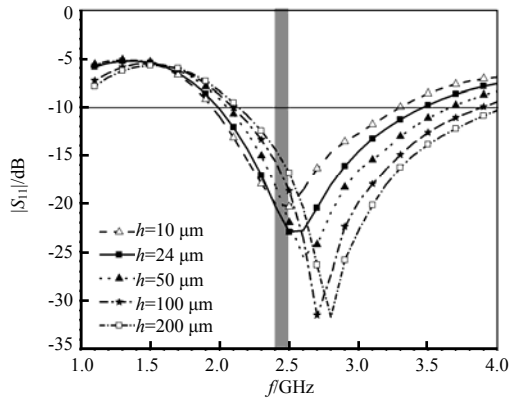


Fig.5 Simulated  $|S_{11}|$  of half-cut CPW antenna with different substrate thickness  $h$   
图 5 半切 CPW 天线  $|S_{11}|$  随衬底厚度  $h$  变化曲线

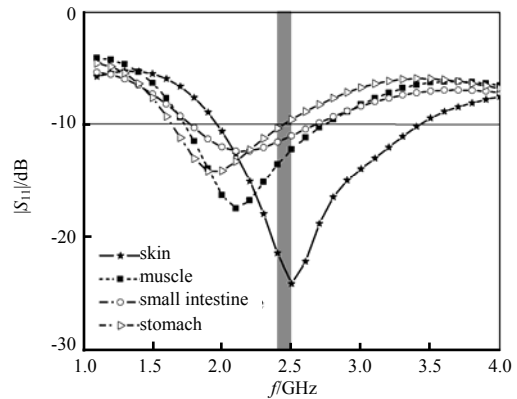


Fig.6 Simulated  $|S_{11}|$  of half-cut CPW antenna in different human tissues  
图 6 半切 CPW 天线在不同人体组织中的  $|S_{11}|$  变化曲线

1.3 天线共形分析

柔性天线的优势是易于共形，本文将半切 CPW 天线与一半径为 6 mm，高度为 14 mm 的圆柱体共形，其结构如图 7 所示。图 8 为天线在不同人体组织中的仿真曲线。表 3 给出了平面天线与共形天线在不同组织中的频率特性，可见人体组织的介质参数差异导致天线的带宽有所变化。本文设计的平面天线以及共形天线由于具有宽的带宽，因此在肌肉、皮肤与小肠中都能覆盖 ISM 频段。

表 3 平面半切 CPW 天线与共形天线在不同人体组织中的频率特性  
Table3 Frequency characteristics of half-cut CPW antenna and conformal antenna in different human tissues

parameter	skin		muscle		small intestine		stomach	
	planar	conformal	planar	conformal	planar	conformal	planar	conformal
resonant frequency/GHz	2.51	3.21	2.08	2.56	2.16	2.67	1.90	2.37
bandwidth/GHz	1.97-3.39	2.33-4.74	1.76-2.77	2.0-3.7	1.80-2.67	1.96-3.77	1.64-2.43	1.86-3.33

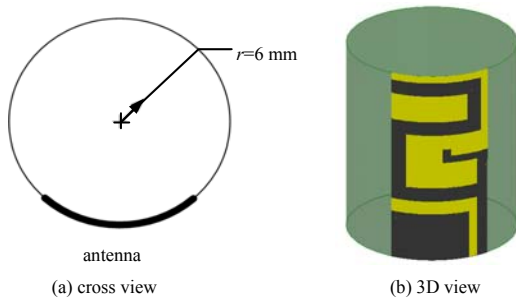


Fig.7 Configuration of conformal antenna  
图 7 共形天线结构图模型

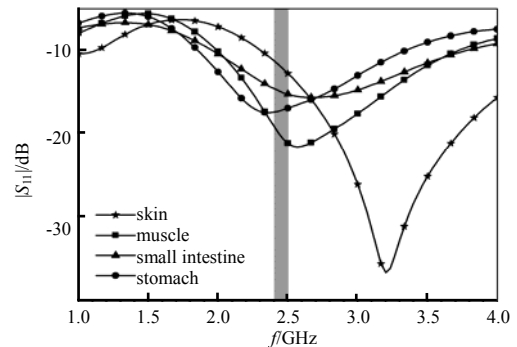


Fig.8 Simulated  $|S_{11}|$  of conformal antenna in different human tissues  
图 8 共形天线在不同人体组织中的  $|S_{11}|$  变化曲线

2 测试结果与讨论

对半切 CPW 天线进行加工，并制作了果冻状的模拟皮肤，将天线分别放置于模拟皮肤与猪肉馅中测试，天线实物及测试环境如图 9 所示。模拟皮肤由 47%去离子水与 53%糖混合，然后在每 100 ml 溶液中加入 1 g 琼脂加热熬制至溶液变透明，然后冷却即成果冻<sup>[16]</sup>。图 9(a)为天线与测试电缆连接的照片。由表 2 可见，人体各组织的电导率  $\sigma$  值均大于 0，当天线直接放置于人体环境中，SMA(Sub-Miniature A)的内外导体会发生短路。因此，在将天线放入人体环境测试之前，需在天线及电缆外紧密包裹绝缘物质，采用食品保鲜膜包裹天线，如图 9(b)所示。图 9(c)为天线放置在果冻状模拟皮肤中测试，图 9(d)为天线放置在猪肉馅中测试。采用安捷伦 N5224A 矢量网络分析仪进行测试，图 10 为测试与仿真曲线。由图 10 可见，在 2 种测试环境中，测试的谐振频率与仿真的基本吻合，但测试的  $|S_{11}|$  比仿真值高，可能是由于仿真采用的人体组织的介质参数与实际值的差异以及包裹塑料

袋中的气体引起的。天线在肉馅中测试的-10 dB 带宽为 1.91~2.65 GHz,在皮肤模拟物中的带宽为 2.19~2.79 GHz,都能覆盖 ISM 频段。将上述平面半切天线粘在半径为 6 mm 的泡沫表面形成共形天线(图 9(e)),天线的测试与仿真结果见图 11。由图可见,天线共形会导致谐振频率增高。由于本文天线具有宽的带宽,共形天线的测试带宽为 2.26~3.11 GHz,仍能够覆盖 ISM 频段。

表 4 为本文天线与文献中 ISM 频段植入天线的比较,与文献[2-5]中的硬质衬底天线相比,本文采用柔性衬底具有更薄的厚度和更轻的质量。与文献[6]的柔性天线相比,本文天线面积更小,厚度更薄,且本文天线在 2 种环境中测试均保持宽带特性。

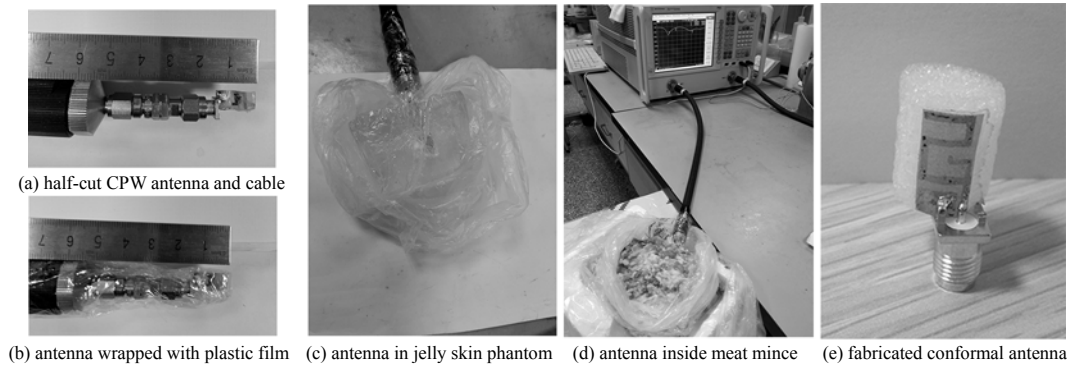


Fig.9 Photograph of fabricated antenna and measurement setup  
图 9 天线实物及测试照片

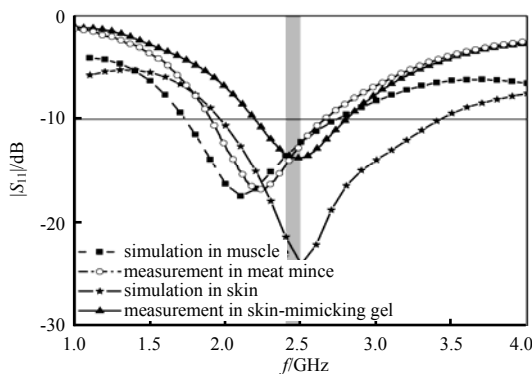


Fig.10 Simulated and measured  $|S_{11}|$  of planar half-cut CPW antenna  
图 10 平面半切 CPW 天线测试与仿真的 $|S_{11}|$ 曲线

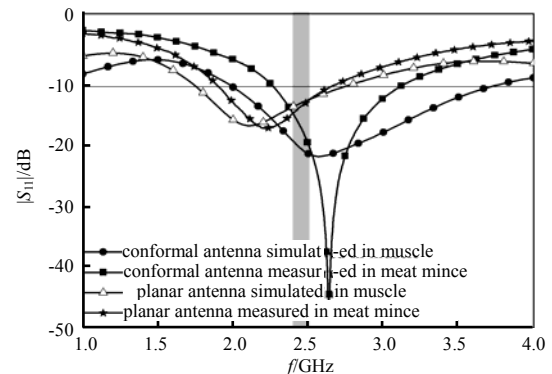


Fig.11 Simulated and measured  $|S_{11}|$  of conformal and planar antennas  
图 11 共形与平面天线的测试与仿真 $|S_{11}|$ 曲线

表 4 本文天线与文献中天线的比较

Table 4 Comparison of proposed antenna with that in published literatures

reference	antenna size/(mm <sup>2</sup> ×mm)	substrate type	bandwidth with $ S_{11}  < -10$ dB/GHz
[2]	72.25×1.27	rigid	2.32~2.62(measured in pork)
[3]	100×1.27	rigid	2.32~2.67(measured in muscle-mimicking liquid)
[4]	100×1.27	rigid	2.111~2.232, 2.242~2.392(measured in mice)
[5]	94.985×3.81	rigid	2.436~2.498(measured in muscle-mimicking liquid)
[6]	414.596×0.147	flexible	2~3(measured in pork)
proposed	87.750×0.024	flexible	1.91~2.65 for planar antenna measured in pork mince 2.19~2.79 for planar antenna measured in skin-mimicking gel 2.26~3.11 for conformal antenna measured in pork mince

### 3 结论

本文提出一种新型柔性可植入天线,天线初始结构为对称状 CPW 天线,对此天线在对称面进行切半得到半切 CPW 天线,天线尺寸减半同时维持宽频带特性。仿真结果表明衬底厚度对天线带宽影响较小,天线在不同人体组织中会产生频率偏移,但在皮肤、肌肉、小肠中均能覆盖 ISM 频段。对天线进行加工,采用猪肉馅和果冻状模拟皮肤分别对天线进行测试,测试结果与仿真基本吻合,天线在 2 种环境中的测试带宽均能覆盖 ISM 频段。

本文天线与半径为 6 mm 的圆柱体共形,天线的测试带宽仍然覆盖 ISM 频段。与目前已有天线相比,本文天线具有尺寸小、质量轻、带宽宽的特性,可应用于胶囊内视镜、无线心脏起搏器等可植入医疗设备中。

#### 参考文献:

- [ 1 ] WANG Jianqing,WANG Qiong. 人体区域通信:信道建模、通信系统及 EMC[M]. 刘凯明,余春东,译. 北京:机械工业出版社, 2015:7-9. (WANG Jianqing,WANG Qiong. Body area communications:channel modeling,communication systems and EMC[M]. Translated by LIU Kaiming,SHE Chundong. Beijing:China Machine Press, 2015:7-9.)
- [ 2 ] LIU X Y,WU Z T,FAN Y,et al. A miniaturized CSRR loaded wide-beamwidth circularly polarized implantable antenna for subcutaneous real-time glucose monitoring[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017(16):577-580.
- [ 3 ] LI H,GUO Y X,XIAO S Q. Broadband circularly polarised implantable antenna for biomedical applications[J]. Electronics Letters, 2016,52(7):504-506.
- [ 4 ] LIU C,GUO Y X,JEGADEESAN R,et al. In vivo testing of circularly polarized implantable antennas in rats[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015(14):783-786.
- [ 5 ] LIU C,GUO Y X,XIAO S Q. Circularly polarized helical antenna for ISM-band ingestible capsule endoscope systems[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014,62(12):6027-6039.
- [ 6 ] JUNG Y H,QU Y,LEE S,et al. A compact parylene-coated WLAN flexible antenna for implantable electronics[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016(15):1382-1385.
- [ 7 ] 王翔,项铁铭. 一种新型 CPW 馈电的植入式天线的设计[J]. 杭州电子科技大学学报, 2016,36(2):23-26. (WANG Xiang, XIANG Tieming. Design of a novel CPW fed implantable antenna[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2016, 36(2):23-26.)
- [ 8 ] LI H,GOO Y X,LIU C,et al. A miniature-implantable antenna for MedRadio-band biomedical telemetry[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015(14):1176-1179.
- [ 9 ] XIAO S,LIU C,LI Y,et al. Small-size dual-antenna implantable system for biotelemetry devices[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016(15):1723-1726.
- [10] XU L J,GUO Y X,WU W. Bandwidth enhancement of an implantable antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015(14):1510-1513.
- [11] ALRAWASHDEH R S,HUANG Y,KOD M,et al. A broadband flexible implantable loop antenna with complementary split ring resonators[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015(14):1506-1509.
- [12] MORIMOTO Y,ANZAI D,WANG J. Antenna development, link budget analysis and specific absorption rate evaluation in ultra-wideband implant communications[J]. IET Microwaves, Antennas and Propagations, 2015,9(14):1574-1580.
- [13] BAHRAMI H,MIRBOZORGI S A,AMELI R,et al. Flexible,polarization-diverse UWB antennas for implantable neural recording systems[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2016,10(1):38-48.
- [14] CHO Y,YOO H. Miniaturised dual-band implantable antenna for wireless biotelemetry[J]. Electronics Letters, 2016,52(12): 1005-1007.
- [15] DUAN Z,GUO Y X,JE M,et al. Design and in vitro test of a differentially fed dual-band implantable antenna operating at MICS and ISM bands[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014,62(5):2340-2349.
- [16] KARACOLAK T,HOOD A Z,TOPSAKAL E. Design of a dual-band implantable antenna and development of skin mimicking gels for continuous glucose monitoring[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008,56(4):1001-1008.
- [17] LIU W J,CHU Q X. Half-cut disc UWB antenna with tapered CPW structure for USB application[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2014,52(6):1380-1384.
- [18] SUN M,ZHANG Y P. Miniaturization of planar monopole antennas for ultrawide-band applications[C]// International Workshop on Antenna Technology:Small and Smart Antenna Metamaterials and Applications. Cambridge,UK:[s.n.], 2007:197-200.
- [19] MOBASHSHER A T,ABBOSH A. Utilizing symmetry of planar ultra-wideband antennas for size reduction and enhanced performance[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2015,57(2):153-166.
- [20] Body tissue dielectric parameters[EB/OL]. (2014-9-10)[2018-09]. <http://www.fcc.gov/general/body-tissue-dielectric-parameters>.