

## 一种应用于脑出血检测的双频宽带贴片天线

白泽霖<sup>1</sup>, 邓煌森<sup>1</sup>, 李昊澄<sup>2</sup>, 陈浩嘉<sup>3</sup>, 陈明生<sup>1</sup>

1. 陆军军医大学生物医学工程与影像医学系电子工程学教研室, 重庆 400038; 2. 中国人民解放军中部战区总医院医学工程科, 湖北 武汉 430070; 3. 陆军军医大学基础医学院物理学教研室, 重庆 400038

**【摘要】目的:**设计制作一种可用于脑出血检测的宽带微波天线。**方法:**在仿真软件中对天线结构和参数进行设计优化。利用人体头部电磁仿真模型进行脑出血检测仿真实验,检测14.1、33.5、65.4 mL 3种不同程度的脑出血。用实际制作的天线进行物理实验,分别测量水、95%酒精、植物油3种不同介电常数的液体在不同体积下(0~10 mL)的 $S_{11}$ 。**结果:**脑出血仿真实验中,在天线工作频带下(2.03~2.30 GHz, 2.90~3.02 GHz)3种不同程度脑出血 $S_{11}$ 差异有统计学意义( $P<0.05$ ),表明该天线可以检测出不同程度脑出血。物理实验中,在实际制作天线工作频带下(2.00~2.27 GHz, 2.85~2.90 GHz),3种液体的 $S_{11}$ 幅值有明显差异,在频谱的波谷位置差异最大,且液体体积越大, $S_{11}$ 幅值的差异越大。提取2.17 GHz的数据观察,3种液体 $S_{11}$ 的幅值随着液体体积的变化而变化,且1~10 mL的 $S_{11}$ 幅值的差异有统计学意义( $P<0.05$ ),表明该天线可以检测物质介电常数和体积的变化。**结论:**该微波贴片天线有应用于脑出血检测的潜力。

**【关键词】**脑出血;微波检测;头模型仿真;天线

**【中图分类号】**R318.6

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2023)06-0720-07

## A dual-band wideband patch antenna for intracranial hemorrhage detection

BAI Zelin<sup>1</sup>, DENG Huangsen<sup>1</sup>, LI Haocheng<sup>2</sup>, CHEN Haojia<sup>3</sup>, CHEN Mingsheng<sup>1</sup>

1. Teaching and Research Section of Electrical Engineering, Department of Biomedical Engineering and Imaging Medicine, Army Medical University, Chongqing 400038, China; 2. Department of Medical Engineering, General Hospital of Central Theater Command, Wuhan 430070, China; 3. Teaching and Research Section of Physics, School of Basic Medicine, Army Medical University, Chongqing 400038, China

**Abstract: Objective** To design and manufacture a wideband microwave antenna for intracranial hemorrhage detection. **Methods** The simulation software was used to optimize the antenna structure and parameters. The simulation experiment of intracranial hemorrhage detection was carried out using the electromagnetic simulation model of human head for detecting different amount of bleeding (14.1, 33.5 and 65.4 mL). The physical experiments were conducted with the actually manufactured antenna, and the  $S_{11}$  of 3 liquids with different dielectric constants, namely water, 95% alcohol and vegetable oil, were measured at different volumes (0-10 mL). **Results** In the simulation experiment of intracerebral hemorrhage, the  $S_{11}$  was statistically different in 3 different degrees of intracerebral hemorrhage at the working frequency bands of the antenna (2.03-2.30 GHz, 2.90-3.02 GHz) ( $P<0.05$ ), indicating that the antenna could detect different degrees of intracerebral hemorrhage. In the physical experiment, at the working frequency band of the actual antenna (2.00-2.27 GHz, 2.85-2.90 GHz), the  $S_{11}$  amplitudes of 3 liquids differed significantly, and the largest difference occurred at the trough position of the spectrum, and the larger the liquid volume was, the greater the difference of  $S_{11}$  amplitude was. The observation on 2.17 GHz data showed that the  $S_{11}$  amplitudes of the 3 liquids changed with the liquid volume, and that there was significant difference in  $S_{11}$  amplitude at 1-10 mL ( $P<0.05$ ), which demonstrated that the antenna could detect the changes in dielectric constant and volume of materials. **Conclusion** The microwave patch antenna has the potential for intracranial hemorrhage detection.

**Keywords:** intracranial hemorrhage; microwave detection; head model simulation; antenna

**【收稿日期】**2022-12-22

**【基金项目】**国家自然科学基金(62171444);全军医学科技青年培育拔尖项目(20QNPY021);陆军军医大学军事医学预研基金(2020XYY16)

**【作者简介】**白泽霖,硕士研究生,研究方向:脑卒中的电磁检测技术, E-mail: zelinbai@163.com

**【通信作者】**陈浩嘉,助教,研究方向:天线理论与设计, E-mail: 1470188740@qq.com; 陈明生,副教授,硕士生导师,研究方向:智能脑卒中电磁检测, E-mail: chenms83@tmmu.edu.cn

前言

脑卒中是我国成人致死、致残的首要原因,随着人口老龄化和城市化进程加速,卒中危险因素流行趋势明显,我国卒中疾病负担有增长的态势<sup>[1]</sup>。作为中风的一种类型,脑出血指颅内血管破裂,血液流入脑实质,具有较高的致死率和致残率,预后差<sup>[2]</sup>。如果患者得不到及时有效的抢救治疗,将会直接危及生命安全<sup>[3]</sup>。目前,临床上主要依靠CT或MRI等影像学设备来检测、诊断脑出血。这类设备体积庞大、价格昂贵、条件苛刻、耗时较长,无法实现床旁监测,也无法在院前急救中发挥作用。因此,催生了一些用于便携快速诊断脑卒中的新技术<sup>[4-13]</sup>。其中微波检测技术因其快速、低成本、易于集成小型化等优点,被国内外学者应用于脑卒中的检测<sup>[14-22]</sup>。天线是微波检测脑卒中的关键部分之一,人体内异常组织的成功检测很大程度取决于天线的性能。微波检测天线应满足天线体积相对较小,近场单向辐射,确保大部分功率发射到人体头部组织中等要求。本文基于对脑出血的检测设计了一款宽带微波天线。

1 天线设计

本文设计的是一款宽带微波贴片天线。图1显示了天线的几何形状和参数。图1a为贴片天线的前视图,黄色部分为辐射贴片,蓝色部分为介质层和接地层,辐射贴片的长 $l_1=50\text{ mm}$ ,宽 $w_1=50\text{ mm}$ 。辐射贴片有4个开槽宽度为1 mm的槽,通过一个短路柱将辐射贴片连接到接地层,并使用 $50\text{ }\Omega$ 的同轴线馈电。图1c为天线侧视图,天线的中间介质有两层分别为空气层和室温硫化型硅橡胶层(简称“硅胶”),空气层的厚度为 $h_1=3\text{ mm}$ ,硅胶层的厚度为 $h_2=8\text{ mm}$ 。为了实现单向辐射特性,在天线后侧使用铜板接地。天线的设计和优化均在Computer Simulation Technology(CST)微波工作室里完成。图1d为实际制作加工的天线图片,辐射贴片,接地层和短路柱均使用紫铜材料,辐射贴片铜板的厚度为1 mm,接地铜板厚度为2 mm,使用激光切割技术在辐射贴片上切割开槽,中间白色介质为硅胶,馈电接头使用SMA接头。天线参数的尺寸(单位:mm)为: $w=60,w_1=50,w_2=10,w_3=15,w_4=10,l=60,l_1=50,l_2=10,l_3=11,d=1,h_1=3,h_2=8$ 。

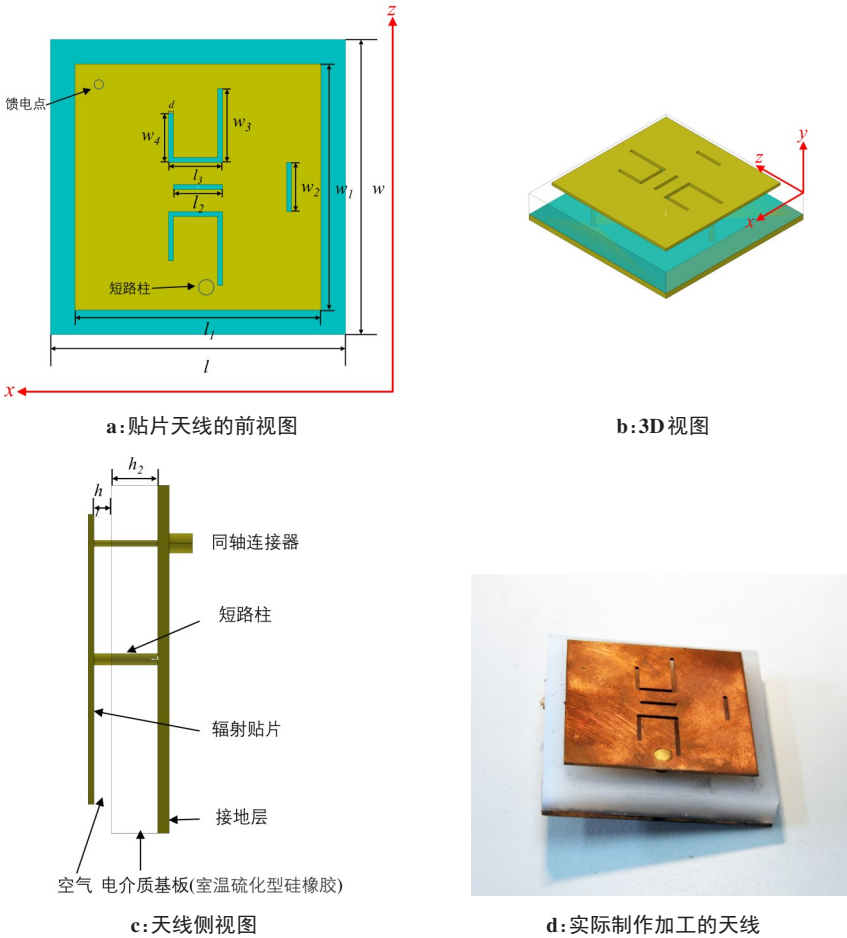


图1 天线几何结构  
Figure 1 Antenna geometry

## 2 仿真实验

本文的仿真实验均在 CST 微波工作室中完成。利用基于中国可视人数据集建立的人体头部电磁仿真模型进行仿真实验,对该天线检测脑出血的安全性和有效性进行评估<sup>[23-24]</sup>。该人体头部电磁仿真模型具有真实的解剖结构,有皮肤、颅骨、眼球、视神经、脑脊液、血液、脑 7 种组织,赋予各组织在仿真频带下的介电常数和切向损耗,便可进行相应频带下的头模型电磁仿真<sup>[25]</sup>。

### 2.1 仿真实验系统

仿真实验系统如图 2 所示,天线放置于大脑右侧位置。图 3 中黑色曲线为天线单独仿真时的反射系数  $S_{11}$  的曲线。此时,天线 -10 dB 以下工作频带为 1.95~2.24 GHz, 2.81~2.95 GHz。图 3 中红色曲线为天线与头模型仿真时  $S_{11}$  的曲线,天线的工作频带稍向右偏移到 2.03~2.30 GHz, 2.90~3.02 GHz。在实际检测系统中矢量网络分析仪的激励功率为 1 mW,所以在仿真实验中同样将激励功率设为 1 mW。图 4 为两个工作频带中心频率 2.17 和 2.96 GHz 下人体头部中的电场分布情况。在头部仿真计算区域内,两个频点最大电场强度分别为 2.536 和 2.448 V/m。相应频率 IEEE 标准下对人体辐射能量密度最大允许值为 7.2 和 9.9 mW/cm<sup>2</sup>。利用式(1)可将能量密度转换为电场值,分别为 164.8 和 193.2 V/m。在 1 mW 的功率下,该天线对人体头部辐射电场强度远小于 IEEE 标准最大允许值,表明该天线用于脑出血检测,符合电磁辐射标准。

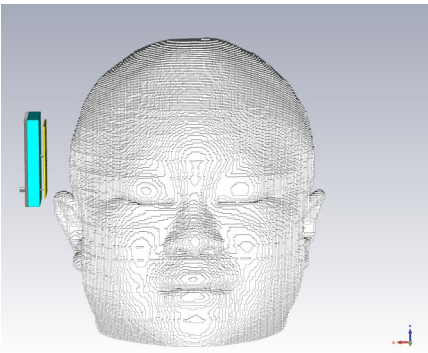


图 2 CST 软件中天线与头模型的仿真图  
Figure 2 Simulation diagram of antenna and head model in CST software

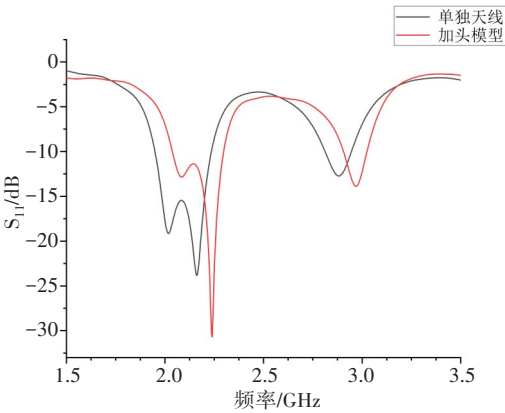
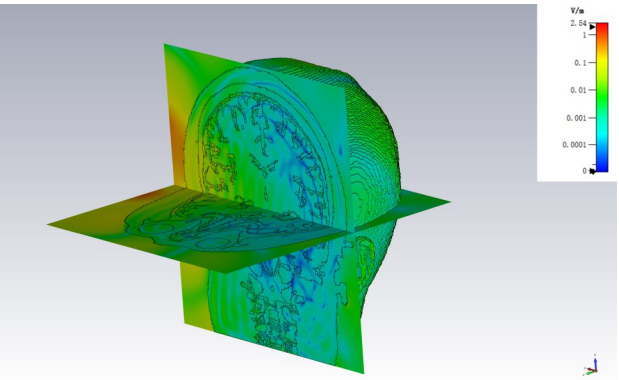
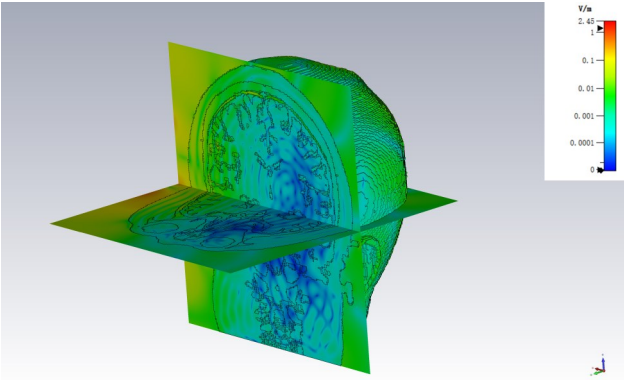


图 3  $S_{11}$  仿真曲线  
Figure 3  $S_{11}$  simulation curve

$$S_{\text{energy\_density}} = \frac{E^2}{377 \Omega} \tag{1}$$



a: 2.17 GHz 下人体头部电场分布图



b: 2.96 GHz 下人体头部电场分布图

图 4 天线工作频带中心频率下人体头部中的电场分布情况

Figure 4 Electric field distributions in the human head at the center frequency of the working frequency band of the antenna

### 2.2 脑出血检测

在头模型大脑中插入一个球体,并给该球体赋予血液的介电常数和切向损耗,便得到脑出血仿真模

型如图 5 所示。图中浅蓝色部分为大脑,红色球为模拟的脑出血,红色小点为大脑血管,包裹大脑的蓝色部分为脑脊液,脑脊液外侧的灰色部分为颅骨,包裹颅骨

的棕色部分为皮肤。通过调整血球的大小、位置模拟不同类型的脑出血。本文用半径分别为15、20、25 mm的血球模拟14.1、33.5、65.4 mL的出血量,分别对应轻度、中度、重度3种出血情况。图6为2.23~2.25 GHz和2.96~2.98 GHz下3种出血量的 $S_{11}$ 仿真结果。从图中可以看出3种出血量的 $S_{11}$ 有明显差异。用SPSS 25.0

分别对天线工作频带2.03~2.30 GHz和2.90~3.02 GHz下3种出血量的 $S_{11}$ 仿真结果进行多个相关样本的Friedman检验,检验结果如表1所示。检验结果表明在天线工作频带下(2.03~2.30 GHz,2.90~3.02 GHz)3种不同程度脑出血的 $S_{11}$ 差异有统计学意义( $P<0.05$ ),表明该天线可以检测出不同程度脑出血。

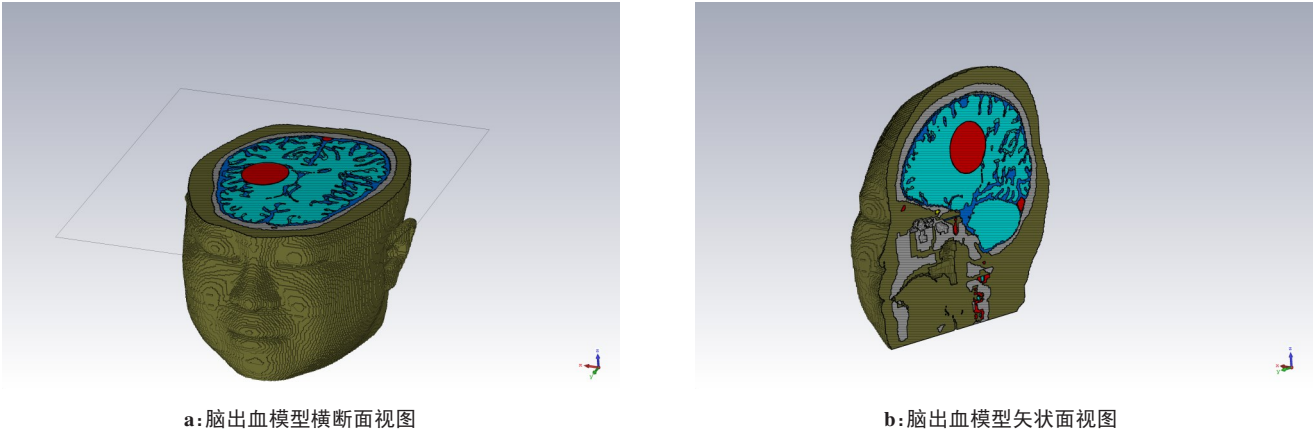


图5 人体头部脑出血模型

Figure 5 Human intracranial hemorrhage model

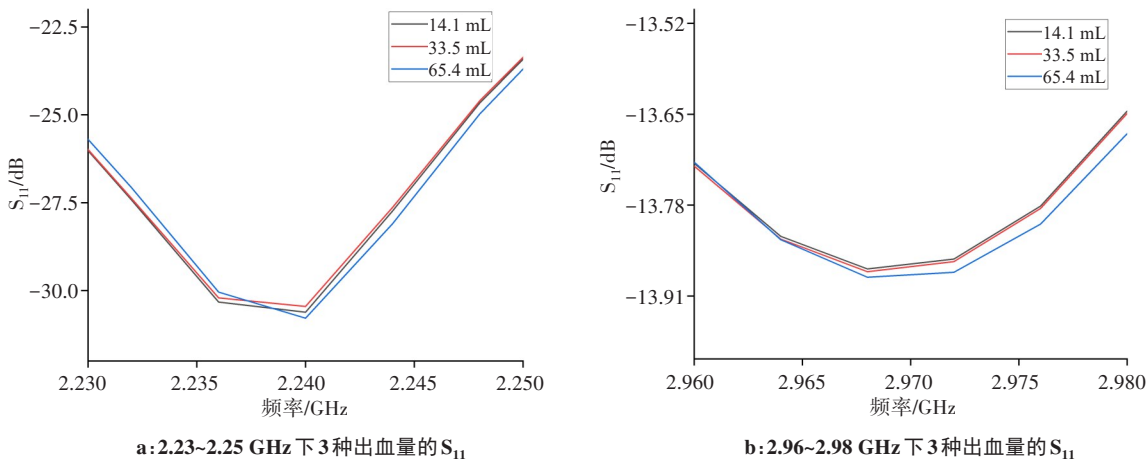


图6 2.23~2.25 GHz和2.96~2.98 GHz下3种出血量的 $S_{11}$ 曲线

Figure 6  $S_{11}$  curves of 3 degrees of intracranial hemorrhage at 2.23~2.25 GHz and 2.96~2.98 GHz

表1 2.03~2.30 GHz和2.90~3.02 GHz下3种出血量的 $S_{11}$ 幅度值多个相关样本的Friedman检验结果

Table 1 Friedman test results of  $S_{11}$  amplitudes of 3 degrees of intracranial hemorrhage at 2.03~2.30 GHz and 2.90~3.02 GHz for multiple related samples

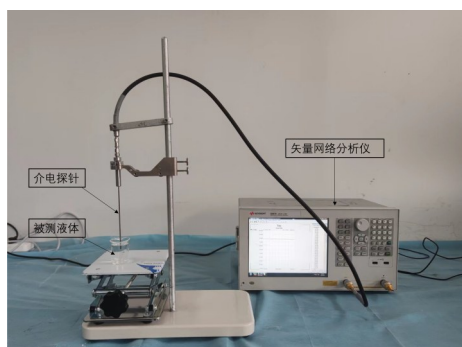
频率/GHz	样本数	$\chi^2$ 值	自由度	$P$ 值
2.03~2.30	67	51.612	2	0.000
2.90~3.02	33	11.091	2	0.004

3 物理实验

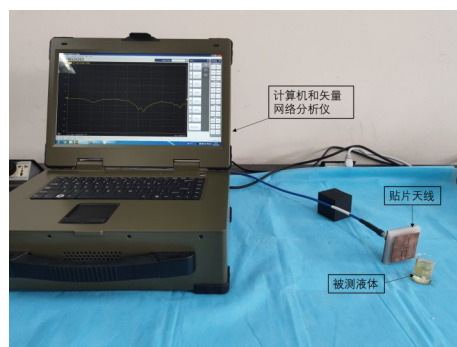
人体不同组织的电特性不同,脑出血微波检测就是用微波天线分辨各种脑组织的不同电特性以及监测其变化。本文用水、95%的酒精、植物油3种不同介电常数的液体进行物理实验。用介电探针(KEYSIGHT N1501A)和矢量网络分析仪(KEYSIGHT E5061B)检测3种液体在500 MHz~3 GHz的介电常数和电导率,实验系统图如图7a所示。测量结果如图8所示,水的相对介电常数在78左右。95%酒精的相对介电常数随着频率升高而降低,在500 MHz到3 GHz的频带上,从26降到10左右。植

物油的相对介电常数一直稳定在2.3左右。用以上3种不同介电常数的液体测试该天线对不同介电常数物质的分辨能力。图7b为实验系统图。将贴片天线连接到矢量网络分析仪的1端口,固定好天线位置。矢量网络分析仪(KEYSIGHT M9370A)和计算机集成于深绿色的机箱内。被测液体放在一个小烧杯内,放置在辐射贴片正前方。实验步骤:(1)将矢量网络分析仪和计算机开机,扫频范围设置为700

MHz到3 GHz,进行校准后,记录保存 $S_{11}$ 幅度数据,为实测天线 $S_{11}$ 幅度数据;(2)将空烧杯放置在指定位置;(3)测量并保存 $S_{11}$ 幅度数据,记为0 mL时的实验数据;(4)用注射器缓缓向烧杯内注入1 mL水;(5)测量并保存 $S_{11}$ 幅度数据,记为1 mL时的实验数据;(6)重复步骤(4)、步骤(5)完成2、3...10 mL时的数据采集;(7)重复步骤2~步骤(6),完成95%酒精和植物油的数据采集。



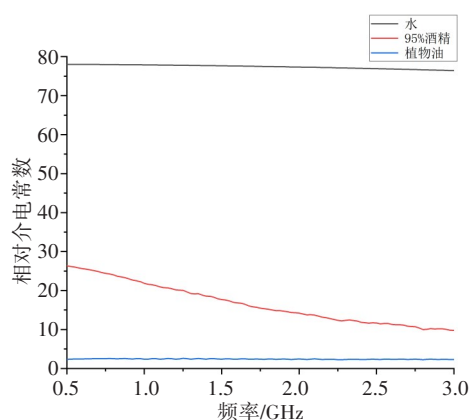
a: 液体介电常数测量系统图



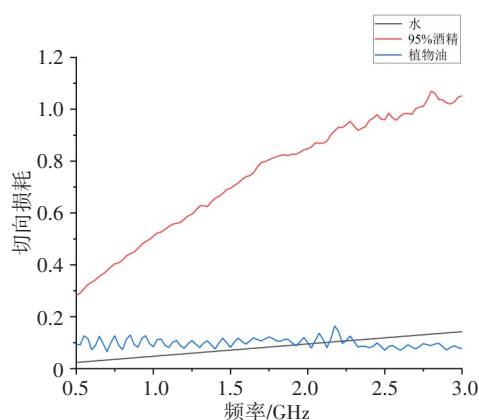
b: 天线检测不同介电常数液体实验系统图

图7 液体介电常数测量和天线检测不同介电常数液体实验系统图

Figure 7 Experimental system for liquid dielectric constant measurement and antenna for detecting liquid with different dielectric constants



a: 水、95%酒精、植物油的相对介电常数



b: 水、95%酒精、植物油的切向损耗

图8 水、95%酒精、植物油的相对介电常数和切向损耗

Figure 8 Relative dielectric constant and tangential loss of water, 95% alcohol and vegetable oil

图9为贴片天线实测的 $S_{11}$ 曲线与仿真结果基本一致,覆盖频段为2.00~2.27 GHz,2.85~2.90 GHz,与仿真结果基本一致。图10为2.85~2.90 GHz频带内3种液体2、4 mL的 $S_{11}$ 幅度测量值。图11为2.00~2.27 GHz频带内3种液体6、8 mL的 $S_{11}$ 幅度测量值。从图中可以看出,在天线工作频带下3种液体的 $S_{11}$ 幅值有明显差异,在频谱的波谷位置差异最大,且液体体积越大, $S_{11}$ 幅度的差异越大。表明天线在工作频带内可以区分不同体积的3种液体,在频谱的波谷位置区分效果较好,且液体体积越大,区分度越大。从3种液体的频谱数据中提

取2.17 GHz的 $S_{11}$ 数据,分别用每种液体1 mL~10 mL的数据减去0 mL数据,得到结果如图12所示。随着液体体积的增加,95%酒精和植物油的 $S_{11}$ 幅值逐渐增大。液体体积在0~6 mL时,水的 $S_{11}$ 幅值表现为震荡变化。但在液体体积在7~10 mL时,随着体积增大,水的 $S_{11}$ 幅值也逐渐增大,与其他两种液体变化趋势一致。从图8可以看出水的介电常数远大于酒精和植物油,水的电特性与酒精、植物油相差较大,所以在液体体积较小的情况下,表现出与其他两种溶液不同的变化趋势。3种液体的 $S_{11}$ 幅值随着液体体积的增大而变化,表明该贴

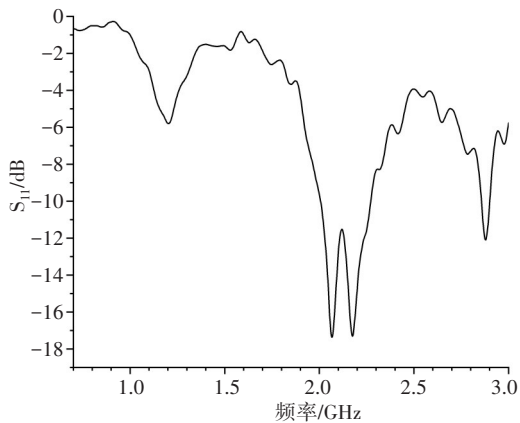
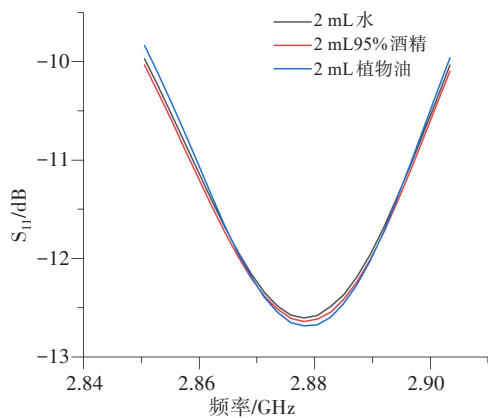


图9 天线 $S_{11}$ 实测曲线  
Figure 9  $S_{11}$  curve measured with antenna

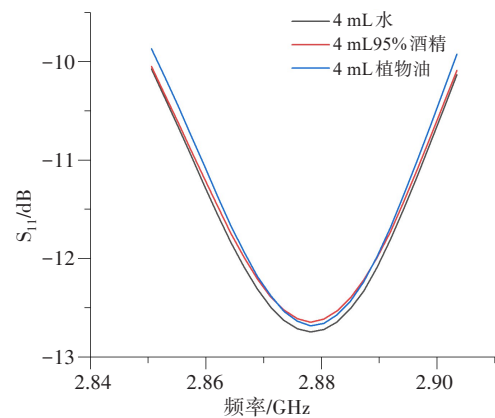
片天线可检测到液体体积的变化。表2为1~10 mL 3种液体 2.17 GHz 下  $S_{11}$  幅值的原始数据,对 1~10 mL 水、酒精、植物油 3 种液体的  $S_{11}$  幅值进行两两成对威尔科克森符号秩检验,3 种液体的  $S_{11}$  幅值的差异有统计学意义 ( $P<0.05$ ),表明该贴片天线可以区分不同介电常数的液体。物理实验表明该天线可以检测物质介电常数和体积的变化。

4 讨论

本文设计制作一款可以应用于脑出血检测的双频宽带贴片天线,利用基于中国可视人数据集建立的人体头部电磁仿真模型对其进行仿真实验研究,

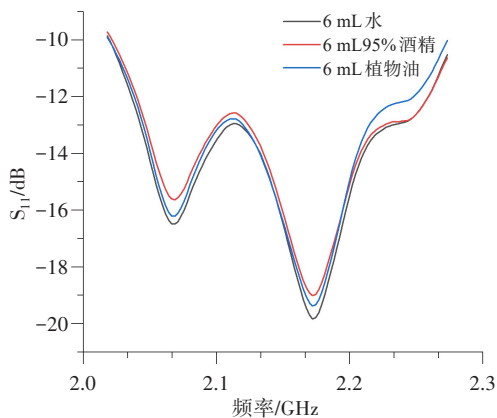


a:3种液体 2 mL 的  $S_{11}$  幅度测量值

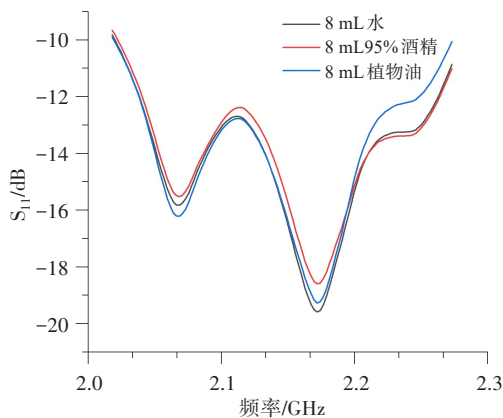


b:3种液体 4 mL 的  $S_{11}$  幅度测量值

图 10 2.85~2.90 GHz 频带内 3 种液体 2、4 mL 的  $S_{11}$  幅度测量值  
Figure 10  $S_{11}$  amplitude measurements of 2 and 4 mL of 3 liquids at 2.85~2.90 GHz



a:3种液体 6 mL 的  $S_{11}$  幅度测量值



b:3种液体 8 mL 的  $S_{11}$  幅度测量值

图 11 2.00~2.27 GHz 频带内 3 种液体 6、8 mL 的  $S_{11}$  幅度测量值  
Figure 11  $S_{11}$  amplitude measurements of 6 and 8 mL of 3 liquids at 2.00~2.27 GHz

用不同介电常数的 3 种液体进行物理实验研究。脑出血仿真实验表明该天线可以检测出不同程度脑出血,实验结果说明该天线可以检测物质介电常数和体积的变化,综合实验结果表明该微波贴片天线有

应用于脑出血检测的潜力。然而,目前只进行了仿真实验和物理实验的研究,未进行动物实验研究,下一步将利用该天线进行动物脑出血实验,进一步研究该天线在脑出血检测中的性能。

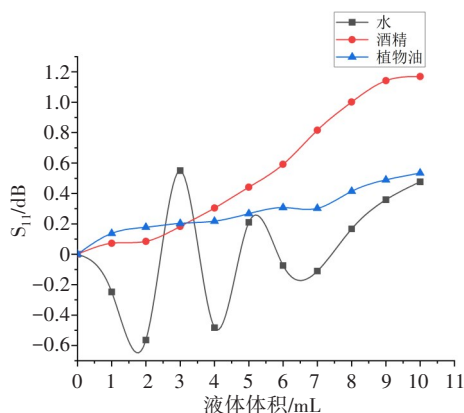


图 12 2.17 GHz 下 3 种液体 1~10 mL 的  $S_{11}$  幅度变化  
Figure 12 Variations of  $S_{11}$  amplitude of 1~10 mL of 3 liquids at 2.17 GHz

表 2 1~10 mL 3 种液体 2.17 GHz 下  $S_{11}$  幅值 (dB)  
Table 2  $S_{11}$  amplitudes of 1~10 mL of 3 liquids at 2.17 GHz (dB)

液体体积/mL	水	酒精	植物油
1	-20.006 3	-19.528 9	-19.544 3
2	-20.322 7	-19.516 7	-19.503 9
3	-19.208 4	-19.418 3	-19.478 8
4	-20.241 1	-19.297 7	-19.463 8
5	-19.548 5	-19.160 3	-19.414 6
6	-19.832 5	-19.009 9	-19.375 2
7	-19.868 5	-18.786 1	-19.379 3
8	-19.591 2	-18.600 2	-19.267 3
9	-19.399 3	-18.459 9	-19.192 3
10	-19.281 9	-18.432 9	-19.147 7

【参考文献】

[1] 《中国脑卒中防治报告2020》编写组,王陇德.《中国脑卒中防治报告2020》概要[J].中国脑血管病杂志,2022,19(2):9.  
Compilation Team of China Stroke Prevention and Control Report 2020, Wang LD. Summary of China stroke prevention and treatment report 2020[J]. Chinese Journal of Cerebrovascular Disease, 2022, 19 (2): 9.

[2] 王拥军. Ccaplan 脑卒中-临床实践[M]. 第5版. 北京:人民卫生出版社,2017.  
Wang YJ. Caplan stroke-clinical practice[M]. 5th ed. Beijing: People's Health Publishing House, 2017.

[3] 韩晋,石艳超,陈淑媛.脑出血危险因素的研究进展[J].医学理论与实践,2020,33(1):28-29.  
Han J, Shi YC, Chen SY. Research progress on risk factors of cerebral hemorrhage[J]. Medical Theory and Practice, 2020, 33(1): 28-29.

[4] He Y, He W, Tan L, et al. Use of 2.1 MHz MRI scanner for brain imaging and its preliminary results in stroke[J]. J Magn Reson, 2020, 319(10015): 106829.

[5] Antipova D, Eadie L, Makin S, et al. The use of transcranial ultrasound and clinical assessment to diagnose ischaemic stroke due to large vessel occlusion in remote and rural areas[J]. PLoS One, 2020, 15(10): e0239653.

[6] Dorn AY, Thorpe SG, Canac N, et al. A review of the use of transcranial doppler waveform morphology for acute stroke assessment[J]. J Clin Neurosci, 2020, 81(10): 346-352.

[7] Spence JD. Uses of ultrasound in stroke prevention[J]. Cardiovasc Diagn Ther, 2020, 10(4): 955-964.

[8] Yang M, Yang Z, Yuan T, et al. A systemic review of functional near-infrared spectroscopy for stroke: current application and future directions[J]. Front Neurol, 2019, 10: 58.

[9] Michelson EA, Hanley D, Chabot R, et al. Identification of acute stroke using quantified brain electrical activity[J]. Acad Emerg Med, 2015, 22(1): 67-72.

[10] Cao L, Li H, Fu D, et al. Real-time imaging of infarction deterioration after ischemic stroke in rats using electrical impedance tomography[J]. Physiol Meas, 2020, 41(1): 015004.

[11] Ke L, Zu W, Du Q, et al. A bio-impedance quantitative method based on magnetic induction tomography for intracranial hematoma[J]. Med Biol Eng Comput, 2020, 58(7): 1-13.

[12] Chen YX, Tan C, Dong F. Combined planar magnetic induction tomography for local detection of intracranial hemorrhage[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2020, 70: 1-11.

[13] Bisio I, Estatico C, Fedeli A, et al. Variable-exponent lebesgue-space inversion for brain stroke microwave imaging[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2020, 68(5): 1882-1895.

[14] Alqadami A, Trakic A, Stancombe AE, et al. Flexible electromagnetic cap for head imaging[J]. IEEE Trans Biomed Circ S, 2020, 58(4): 857-869.

[15] Vasquez J, Scapaticci R, Turvani G, et al. Design and experimental assessment of a 2D microwave imaging system for brain stroke monitoring[J]. Int J Antenn Propag, 2019, 2019: 1-12.

[16] Persson M, Fhager A, Trefna HD, et al. Microwave-based stroke diagnosis making global prehospital thrombolytic treatment possible[J]. IEEE Trans Bio-Med Eng, 2014, 61(11): 2806-2817.

[17] Alqadami A, Nguyen-Trong N, Mohammed B, et al. Compact unidirectional conformal antenna based on flexible high-permittivity custom-made substrate for wearable wideband electromagnetic head imaging system[J]. IEEE Trans Antenn Propag, 2020, 68(1): 183-194.

[18] Alqadami A, Stancombe AE, Bialkowski KS. Flexible meander-line antenna array for wearable electromagnetic head imaging[J]. IEEE Trans Antenn Propag, 2021, 69(7): 69-77.

[19] Mohammed BJ, Abbosh AM, Mustafa S, et al. Microwave system for head imaging[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2013, 63(1): 117-123.

[20] Ireland D, Bialkowski ME. Microwave head imaging for stroke detection[J]. Prog Electromagn Res M Pier M, 2011, 21: 163-175.

[21] Mohammed BJ, Ireland D, Abbosh AM. Experimental investigations into detection of breast tumour using microwave system with planar array[J]. Iet Microw Antenna P, 2012, 6(12): 1311-1317.

[22] Alqadami A, Bialkowski KS, Mobashsher AT, et al. Wearable electromagnetic head imaging system using flexible wideband antenna array based on polymer technology for brain stroke diagnosis[J]. IEEE Trans Biomed Circ S, 2019, 13(1): 124-134.

[23] 张绍祥,刘正津,谭立文,等.首例中国数字化可视人体完成[J].第三军医大学学报,2002,24(1):1231-1232.  
Zhang SX, Liu ZJ, Tan LW, et al. Number one of Chinese digitized visible human completed[J]. Journal of Third Military Medical University, 2002, 24(1): 1231-1232.

[24] 李昊澄,宁旭,谭立文,等.基于中国可视数据集的时域有限差分法人体头部电磁仿真模型构建[J].中国医学物理学杂志,2021,38(7):837-841.  
Li HC, Ning X, Tan LW, et al. Construction of human head electromagnetic simulation model based on Chinese visual human data set by finite difference time domain method[J]. Chinese Journal of medical physics, 2021, 38(7): 837-841.

[25] Gabriel C, Gabriel S, Corthout E. The dielectric properties of biological tissues: I. literature survey[J]. Phys Med Biol, 1996, 41(11): 2231-2249.

(编辑:陈丽霞)