

文章编号: 2095-4980(2023)09-1124-11

微波技术在大脑深层信息探测的应用研究进展

蒋廷锋^{1a}, 叶菁华^{*1b}, 施开波^{1b}, 朱铎丞²

(1.成都大学 a.计算机学院; b.电子信息与电气工程学院, 四川 成都 610106; 2.四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要: 微波技术对大脑信息进行探测正处于发展时期, 目前正逐渐走向成熟, 现已用于实体的检测与操作中。通过联合超声波、核磁等方法, 完善了微波信息探测体系, 增强了微波信息探测的效率。本文基于对大脑深层信息探测的 3 种微波技术以及现有微波探测技术中存在的问题进行总结, 并对微波技术未来在大脑信息探测上的应用进行展望。通过对 3 种不同微波探测应用的分析, 发现微波技术对大脑的探测具有巨大的潜力。这些应用可以有效地为脑部组织或人体其他组织的病态检查提供解决方案。同时, 通过与人工智能结合, 微波技术还可用于脑部的远程监测或身体的其他部位的远程监测中。

关键词: 微波技术; 脑神经; 电位变化; 温度探测; 超宽带技术

中图分类号: TN99

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021234

Application of microwave technology in deep brain information detection

JIANG Tingfeng^{1a}, YE Jinghua^{*1b}, SHI Kaibo^{1b}, ZHU Huacheng²

(1a.School of Computing; 1b.School of Electronic Information and Electrical Engineering, Chengdu University, Chengdu Sichuan 610106, China; 2.College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064, China)

Abstract: Microwave technology for brain information detection, which is gradually becoming mature, has been applied to the entity detection and operation. Through the combination of ultrasonic and nuclear magnetic methods, the microwave information detection system has been improved and the efficiency of information detection has also been enhanced. Three kinds of microwave technologies of brain deep information detection and the existing problems are concluded in this paper. It is found that the microwave technology has great potential in brain detection through the analysis on three different microwave detection applications. These applications can effectively provide solutions for pathological examination of brain tissue or other human tissue. By combining with artificial intelligence, microwave technology can also be applied in remote monitoring of the brain or other parts of the body.

Keywords: microwave technology; brain nerve; potential change; temperature detection; Ultra-Wide Band(UWB)

人类所有的智能活动, 如学习、记忆、沟通, 思考和决策等, 都依赖于大脑神经细胞有组织的活动和功能。但人类对大脑的核心功能, 如意识的产生、情绪和情感、创造能力等依然知之不多。大脑这个世界上最为复杂、精密, 包含了百亿级的神经元和百万亿级的神经突触连接的机器, 充满着未知的秘密。为研究这个机器, 必须用到观察大脑的脑成像技术, 而微波技术则是现在具有巨大发展潜力的一种探测技术, 可以通过成像的手段探测到大脑的深层信息。微波成像具有非唯一性、不稳定性、非线性关系, 令处理全域优化问题的最有力的数值方法——遗传算法成为了处理微波成像问题的有力助手。但目前遗传算法并不完善, 效率低。单一的遗传算法^[1]无法全面优化问题, 需要分层优化约束, 导致计算时间长, 精确度低, 适应范围窄等。经过多年的发展, 改进诞生了许多不同的算法, 如多层快速多极子算法(Multi-Level Fast Multipole Method, MLFMM)反演成像^[2]、结合子孔径相关(Map-Drift, MD)自聚焦算法与回波模拟算子的快速稀疏微波成像误差补偿算法等^[3]。在未来的研究中, 微波技术甚至可以运用到一些特殊的放射治疗中, 并与人工智能结合, 实现对人体大脑或其他部位的远程

收稿日期: 2021-06-04; 修回日期: 2021-06-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61971295)

*通信作者: 叶菁华 email:yejinghua@cdu.edu.cn

监测。这就是目前新兴的微波视觉概念^[4]，此概念的实现需解决的技术难题包括大规模场景与目标的快速计算仿真、无限解空间的搜索与学习、类脑思维的微波眼睛的智能技术等^[5]，在具有巨大的发展潜力同时面临严峻的挑战。

本文总结了现已出现的3种微波探测技术，并基于3种不同的探测技术以及现有微波成像技术存在的问题进行探讨，对微波具体在大脑上可应用的前景和可实现性进行总结、拓展。

1 微波在探测脑部神经活动中的应用

已有的研究表明，大脑神经活动的产生、传递是通过神经元完成的。当神经细胞受到一定的刺激进入兴奋状态时，钠离子通道开放，钠离子将从浓度高的细胞膜外流向浓度低的细胞膜内，产生动作电位。由于钠离子、钾离子移动等因素，兴奋的细胞区域的电导率、介电常数等电参数会发生相应变化。当微波经过该脑功能区时，会由于介电常数的变化产生一个幅度和相位变化。电参数变化范围越大，兴奋区体积越大，则透射波的幅度与相位的改变量也越大。将这些参数转换成电信号存入计算机，并利用反演算法，建立相应的模型进行分析、处理，再构建大脑内部的图像，达到电磁微波检测的目的^[6]。微波检测大脑神经活动时，天线贴近人体头部，其辐射特性不仅由自身的结构决定，也会受到其周边媒质或脑部灰质的影响^[7]。若透射波过于微弱或接收到的电磁信号不经过待检测区时，利用微波传输法将无法检测大脑神经活动信号或产生误差。

脑部神经探测系统通常由软件和硬件组件组成。硬件从被测样品中收集数据，发射天线向被测样品(如用于医学成像的人体)发送电磁波(EMW)。如果样品仅由均质材料制成，且尺寸无限大，则理论上不会反射任何EMW。与周围的均匀介质相比，具有不同属性(即电磁参数)的任何异常的引入都可能反射一部分EMW。异常性质的介质与周围介质之间的差异越大，反射波将越强，这种反射由系统中的接收天线收集。为提高成像系统的跨范围分辨力，应在间距小于工作波长的区域(称为采样区域)上分布多个接收天线。但彼此靠近放置的天线之间的相互耦合可能会降低收集到的信号的准确性，且发射器和接收器系统将变得非常复杂。为解决这些问题，使用单个扫描天线代替多个天线。在这种配置中，天线扫描整个采样区域，然后将收集的数据与其天线位置坐标一起映射。实际上，通过移动天线可以产生合成孔径^[8]，然后将原始数据输入到软件中进行处理(类似于合成孔径雷达原理)。

WANG等引入一个三维头部模型^[9]，通过在该头部模型中嵌入一个组织块探测脑皮层动态介电特性，如图1所示，并设计了头部模型周围的六元喇叭天线阵以获取脑部的神经活动，实现对头部模型内部不同位置(视觉皮层和听觉皮层)2种脑活动的探测。对不同方向微波散射的仿真结果如图2~3所示(1、3列图为天线1~6发射系数的相位变化，2、4列为相应的谱密度分布)，表明前向散射具有较好的适用性。从S参数的相位变化中可以提取出与脑神经元活动相关的介电常数变化频率(10 Hz、20 Hz)。此外，比吸收率的分析确保了在人体头部探测系统设计中微波的安全性。电磁波在脑功能部位传播的相位随动态介质的变化而变化，从传输系数的相位变化中可以提取出介质介电常数变化的频率。实际操作中因考虑到微波发射系统的安全，使用的实验数据远低于建议的极限，产生了适用范围窄的问题，但实验结果最终还是表明，从接收天线获得的相位变化信息可以明确大脑中不同位置活动情况。

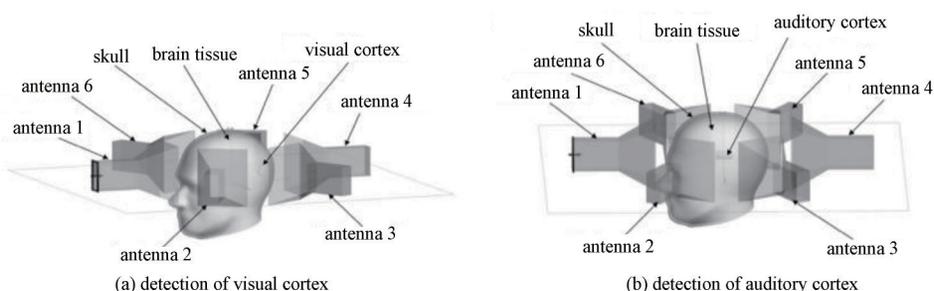


Fig.1 Six element horn antenna array head model for detecting the dynamic dielectric properties of cerebral cortex
图1 探测脑皮层动态介电特性的六元喇叭天线阵头部模型

此外，萨尔格林斯卡医学院与查尔姆斯理工大学合作，对利用微波在脑中探测方面进行研究，设计了2款检测系统，如图4所示。分别采用10个和12个天线单元，放置于人头部的不同位置，系统利用开关矩阵实现一发多获取一系列信号，然后经过特定算法处理检测到的微波信号，获得病症信息。为改善检测装置的舒适性，可将天线阵列布置在自行车的头盔内。测试结果表明，微波检测系统可区分出血性脑中中风大脑和健康大脑^[10-11]。

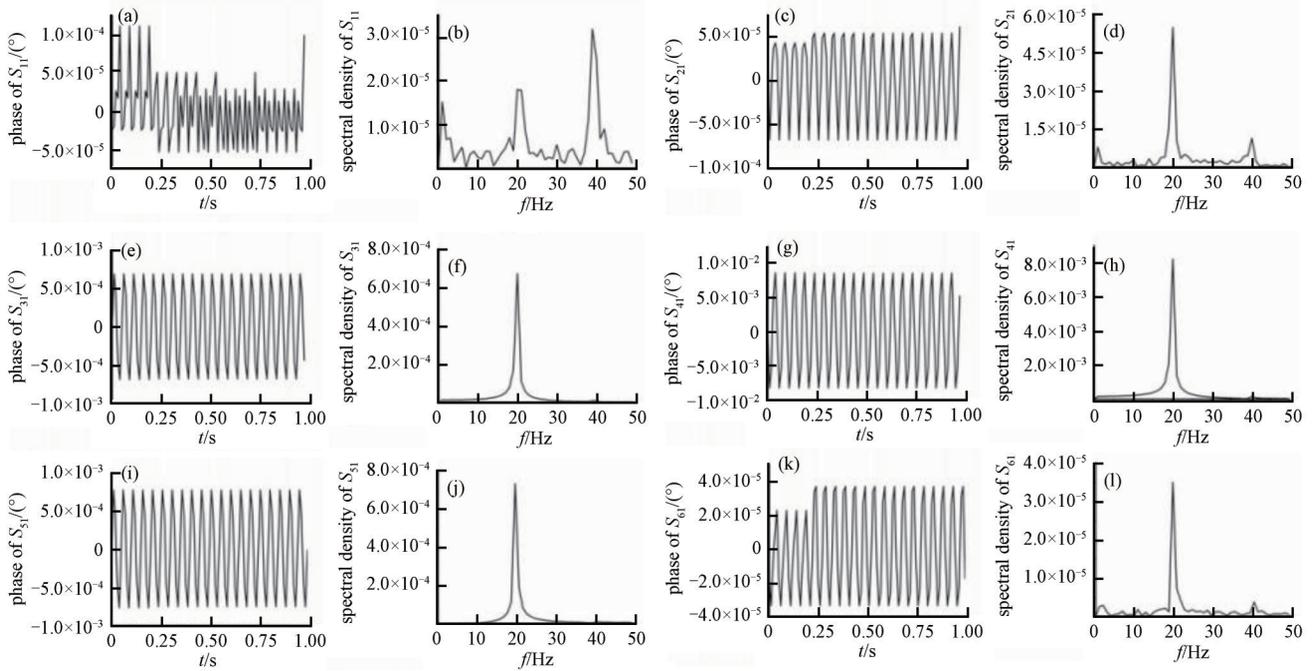


Fig.2 Simulation results of head visual cortex

图2 头部视觉皮层的模拟结果

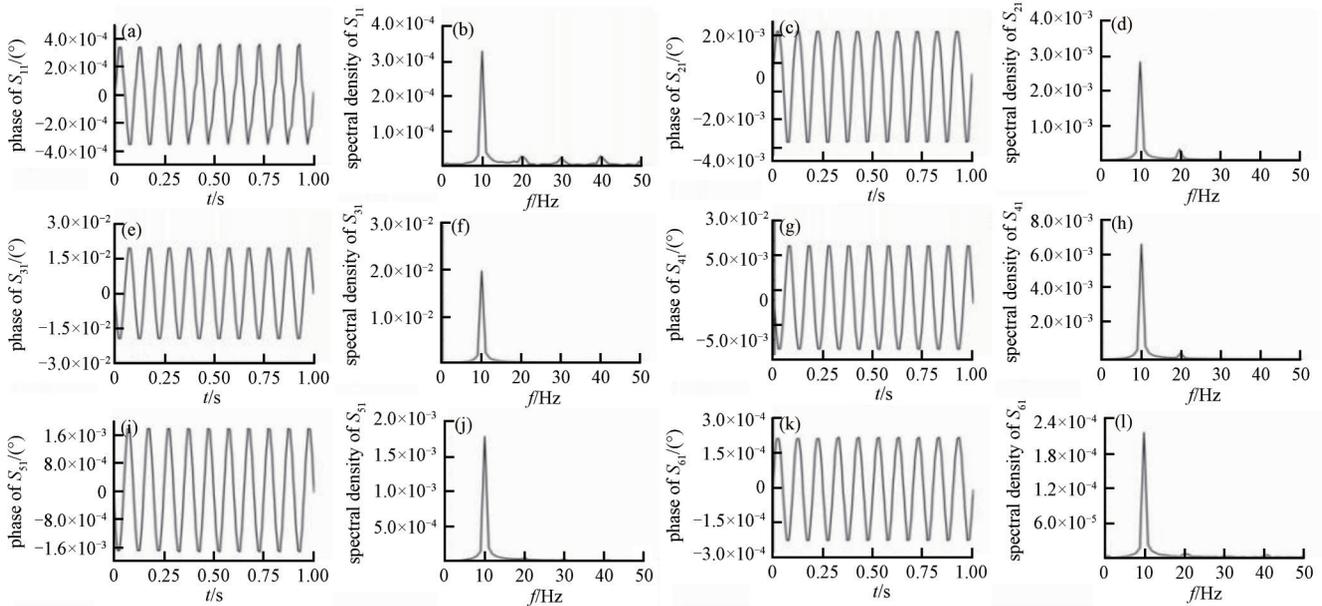


Fig.3 Simulation results of head auditory cortex

图3 头部听觉皮层的模拟结果

从以上三维头部模型中的仿真结果可见：从接收天线获得的相位变化信息可以指示大脑在不同位置的活动。均匀平面波在三层动态介质中的传播表明了介电常数的变化与传输相位的关系。即大脑活动在不同的位置可以通过相位变化信息来探测，从接收天线获得大脑不同位置的探测。同时，根据脑功能部位的动态电介质和脑功能成像的电磁波方法^[12]可开发一种新的脑功能成像方法。通过脑功能部位电介质随着局部神经元的激活而变化，可实现大脑神经或生理病态的探测功能。根据 Li 等的实验(图 5)^[12]说明了脑神经通电活动后，电介质在脑功能部位介电常数的变化引起了电磁波在脑内传播时的相位变化。这是由于在大脑功能部位的神经元激活产生了巨大的跨膜离子流，改变了神经元的离子浓度，而细胞外的液体在功能位点，会改变液体的介电常数，从而可使用微波技术对其探测。通过测量电磁波相位的变化(详见图 6)，可以测量神经元的活动。此外，动态特性的介质为大脑功能的神经网络提供了基础的射频电磁波功能性大脑成像方法，即活跃态。说明微波可用于大脑的探测，尽

管大脑的介电常数会因为不同的原因改变，但也可以得到一个较为可靠的预测结果。

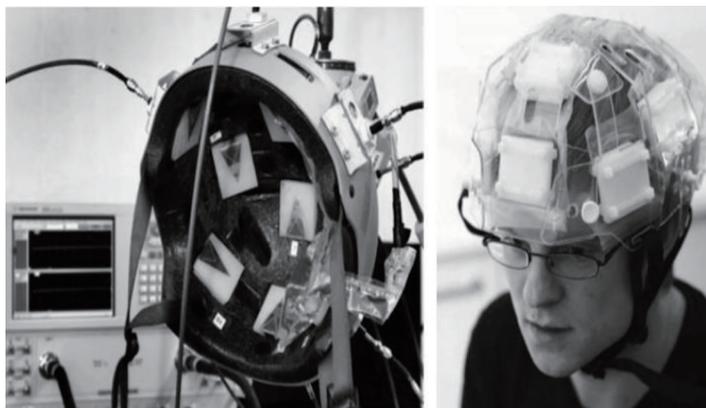


Fig.4 Head mounted detection device for cerebral neuropathy

图4 头部佩戴式大脑神经病态探测装置

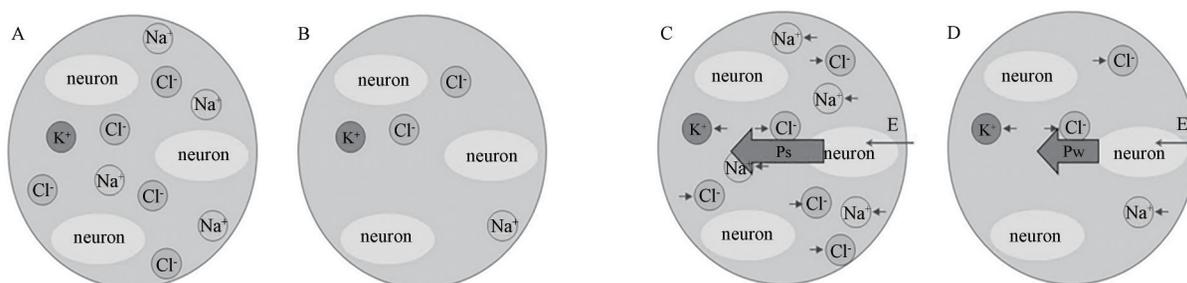


Fig.5 Schematic diagram of neuronal activation in functional parts of the brain generating tremendous transmembrane ion flow

图5 大脑功能部位的神经元激活产生了巨大的跨膜离子流动示意图

利用现有技术，还可以将超宽带信号(UWB)介质匹配天线用于微波检测中^[13-16]，因为：a) UWB脉冲信号具有很好的穿透性能。从时域方面看，脉冲波的持续时间相对较短；b) 定位精确度很高。用于微波检测时，UWB脉冲信号的精确度通常可达到厘米级，可比拟GPS；c) UWB信号检测与传统的CT、X光等技术相比，辐射功率很小，由检测而致使正常生物组织出现癌变的可能性非常小。如，姜兴等研究的天线与反射板间的空气层用EPE珍珠棉填充^[17](图7(a))，并用防水胶密封。组织模拟液由水和聚乙二醇(PEG 400)按6:4比例配制而成，介电常数 ϵ_r 为33.67，电导率 σ 为0.5 S/m，其介电参数接近于工作频带内人头部各组织电参数的均值。测试内容包含介质匹配天线反射系数测试、收发天线之间传输系数测试。图7(b)为天线的测试环境，将待测天线浸入组织模拟液中，接收天线为同轴探针，使用Agilent N5230A矢量网络分析仪可对天线实物进行反射系数及传输系数测量。结果表明，相比普通天线，2.3~5.5 GHz的电磁波在脑组织中具有更好的传输性能，满足微波传输对脑活动探测的需要。将超宽带天线直接与头部有耗组织匹配，能有效减弱入射波在空气与头皮边界的反射，使更多的能量透入大脑内，满足微波检测大脑活动的需要。因此，在下一阶段大脑活动探测中，为便于接收多个传输路径的散射波及对不同脑区活动的探测，需要进一步研究佩戴式头部共形多原件天线阵列与UWB的结合。

2 微波在脑部成像中的应用

CT、MRI等传统方法虽已广泛用于生物学成像，但由于体积大，价格昂贵，耗时长，无法在此基础上设计出便携式的早期诊断衍生系统^[18]，不适用于检测小的血液区域，且对噪声很敏感^[19-20]。相比之下，微波成像技术具有成像质量高，成像速度快，系统成本较低，成像系统简便的优势，适用于小范围血液区域。为早期诊断脑卒中患者并进行治疗，提供了新的微波检测技术^[21-22]。

陈天琪等设计了一款工作在1.7~4 GHz的超宽带Vivaldi天线，可用于微波信号发射与接收，并完成对脑部模型与超宽带微波天线所构建的脑部成像系统的仿真^[23]。如图8所示，脑组织球体模型的球心固定于坐标轴的原点，天线靠近脑组织模型的宽边与原点的垂直距离为30 cm。仿真结果可以清晰地显示出脑部血块的位置，但预测血块的中心位置与模型中血块中心位置仍有毫米级的差距。在未来要求天线小型化、保证制造精确度、降低回波损耗等不稳定因素的情况下，将有望实现便携、低成本的实时脑部成像^[24]。

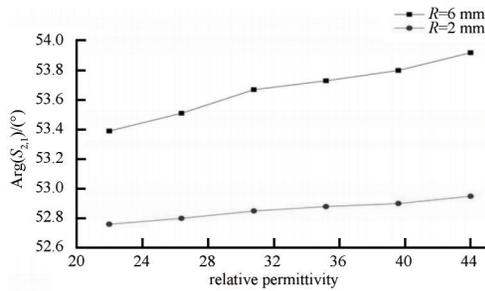
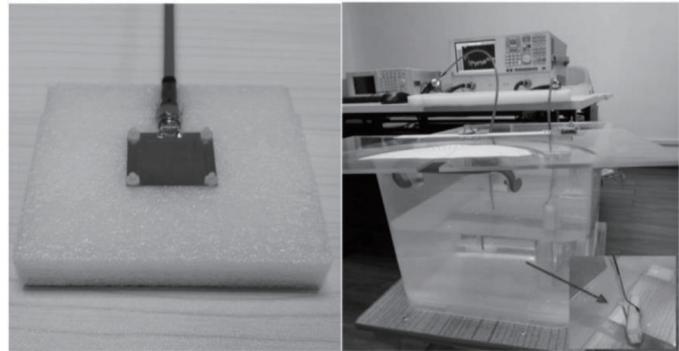


Fig.6 The phase change curves of Arg(S_{2,1}) versus the relative permittivity of the medium in the brain region when the 30 GHz electromagnetic wave propagates in the activated brain region

图6 30 GHz 电磁波在激活脑区传播时,相位变化Arg(S_{2,1})随脑区介质相对介电常数的变化曲线

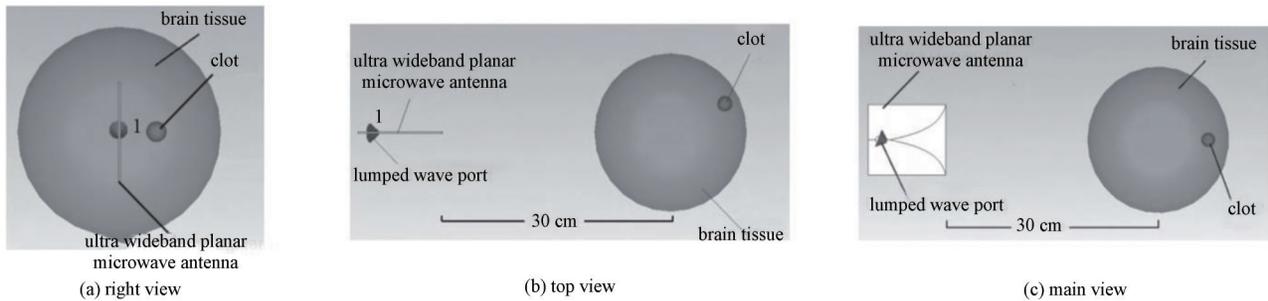


(a) antenna object

(b) test environment

Fig.7 Test environment of antenna

图7 天线的测试实验环境



(a) right view

(b) top view

(c) main view

Fig.8 Simulation model of microwave brain imaging system

图8 微波脑部成像系统仿真模型

数据的生成依赖于大量的天线,这增加了处理时间和耦合效应。压缩感知技术在微波成像的应用中脱颖而出, Bilgin 等提出了一种基于衍射层析压缩传感技术(compressive sensing)^[25]。该方法在 2 个不同的时间瞬间测量散射场数据, 2 个测量值之间的差异构成了用于衍射层析的数据。由于该数据是自然稀疏的, 因此压缩感知技术可利用这种稀疏性。与传统的微波衍射层析成像方法相比, 该方法在较少的天线情况下可获得更精确的成像结果。在 30 dB 和 40 dB 高斯白噪声条件下对该方法的鲁棒性进行验证, 结果表明该方法比传统方法具有更强的鲁棒性。Bilgin 等还将压缩感知技术与微波衍射层析成像技术相结合, 形成了一种更实用、更健壮的差分成像技术, 如图 9~图 10 所示。图 9 为实验模型, 图 10(a)为通过衍射层析获得的无稀疏视图的处理结果, 图 10(b)为稀疏处理结果; 图 10(c)为无稀疏视图处理结果的重建轮廓绝对值; 图 10(d)为稀疏处理后的结果, 验证了该方法的鲁棒性。该实验还利用最小二乘法对非均匀傅里叶变化求微分对比度函数的初值, 使用该初始对比函数作为迭代加权最小二乘法的初始值^[26]。通过该算法在迭代过程中对稀疏对比函数重新求值增强结果, 并记录 2 次测量之间的头部假体内部的电参数的变化。观测结果表明, 该方法可以准确地定位这些变化, 即使使用的数据来源比传统的衍射断层扫描少 3 倍, 该方法仍可准确定位这些变化(减小或增加), 以确定人脑内血液区域的大小。白佳俊等也做过类似的压缩感知成像实验, 利用超材料同样实现了对信息的物理层压缩, 减少了数据的采样和传输压力, 但由于波段限制, 此方法只能得到厘米级分辨成像^[27]。同时该方法也能在有噪声的情况下进行检测, 因此, 该方法特别适合在便携、嘈杂的环境下对脑卒中连续监测。

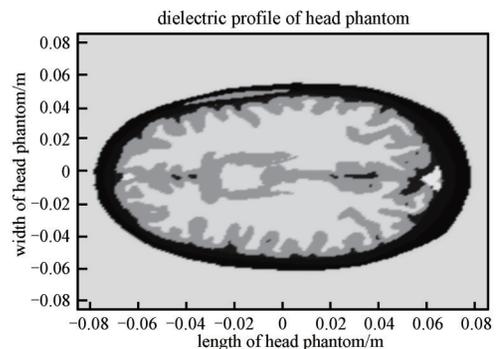


Fig.9 System setup media profile and matching media with Zubal head image

图9 系统设置与 Zubal 头部映像的介质轮廓和匹配介质

微波诱导热声断层成像(Thermo Acoustic Tomography, TAT)作为一种非侵入式和非电离式的新型医学功能成像方式^[28-31], 已有一些研究者从事相关的研究。Zhao 等研制了一种优化微波照射和超声检测的圆柱扫描成像系统, 如图 11 所示, 图中: DAQ(Data Acquisition Card)、AP(Amplifier)、LM(Linear translation step Motor)、RM (Rotator step Motor)、WG(Coaxial waveguide switch)、ML(Matching Layer)、T(Ultrasonic Transducer)、BT(Breathing

Tube)、TH(Thermoelectric thermometer); HT(Heater)、H(mouse Holder)^[28], 利用新生儿小鼠将自体血液注入心室周区域检测生发基质出血模型。结果表明, 该成像结果与脑组织的相应形状和大小一致, 成像的分辨力可达 $0.3\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ ^[28]。一些其他的器官和组织也被鉴定出来了, 即使用 TAT 可以更准确地检测新生儿小鼠大脑不同深度的水肿区域。因此, TAT 在神经科学研究和脑部疾病的广泛成像研究中具有很大的潜力。

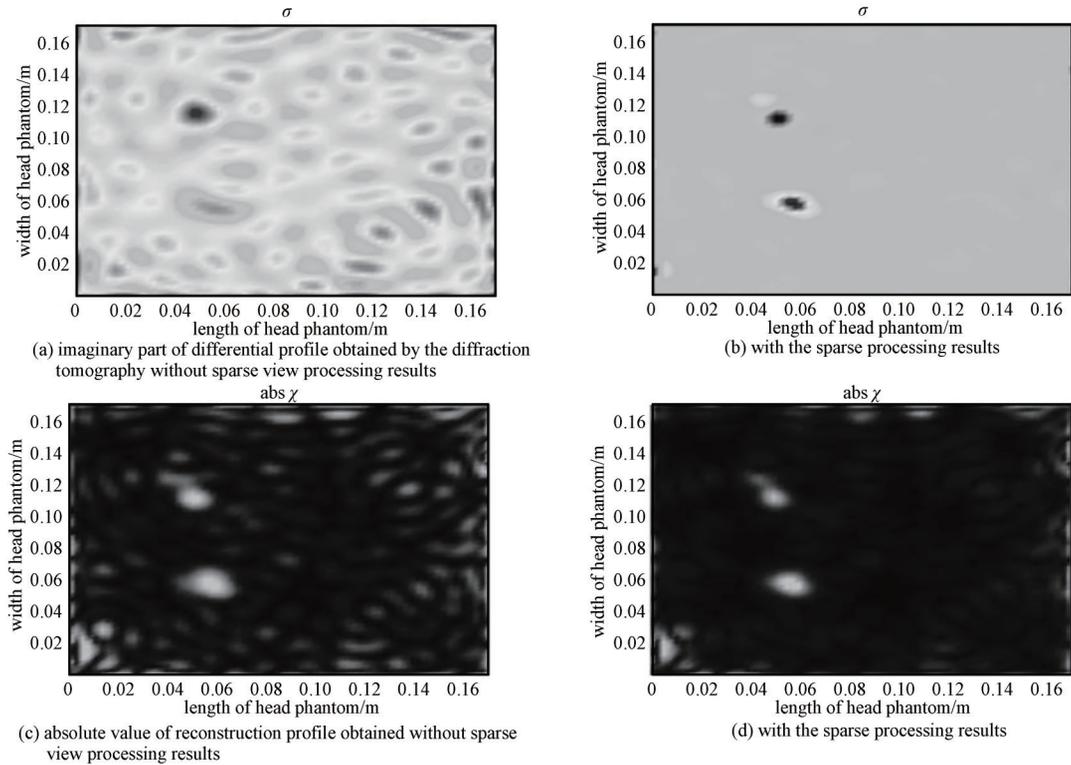


Fig.10 The reconstructed image for 2D head phantom under $R_{SN}=30\text{ dB}$

图 10 重建图像信噪比 $R_{SN}=30\text{ dB}$ 条件下的 2D 头部映像

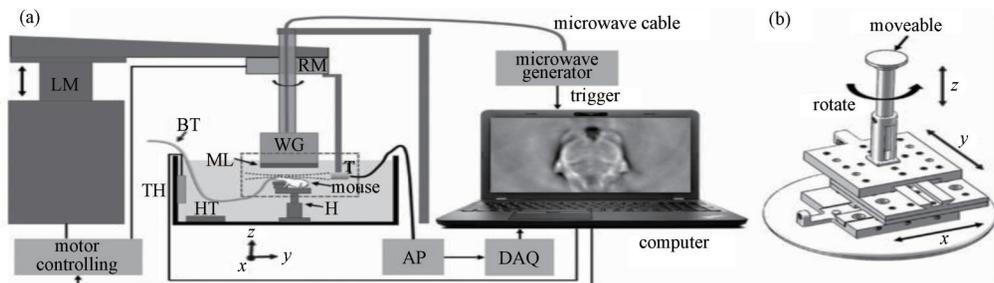


Fig.11 (a) experimental setup of thermoacoustic tomography system for in vivo neonatal mouse brain imaging;

(b) the close-up view of 3D-printed mouse holder/rotator/translation stages

图 11 (a) 新生小鼠脑成像热声层析成像系统的实验装置;(b) 3D 打印鼠标座/旋转器/平移平台的特写视图

为避免单一成像的局限性, 提出了混合型的成像策略^[32-34]。Huang 等使用组合共振(Magnetic Resonance, MR)-光声(Photo Acoustic, PA)-热声(Thermo Acoustic, TA)成像技术, 进行无创、高分辨力和敏感的病态检测^[32]。实验(图 12)利用圆柱扫描、TA 和 PA 成像系统恢复了 3 只结肠癌小鼠的介电和光学特性分布, 采用 7.0 t 磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)装置, 根据鼠体体积线圈对功率的要求, 提供了一种低成本的双模态技术。通过优化换能器的结构和微波脉冲宽度, 实现了一种低峰值功率微波激励同一小鼠进行高分辨力结构成像。结果表明 Mr-PA-TA 组合成像的空间分辨力可达 $0.41\text{ mm}\times 0.41\text{ mm}$ ^[32], 且降低了对微波功率的要求, 提供了一种低成本的双模态技术。但这个实验模型, 不支持实现真正的三维模态的 CT/PET/MRI 成像, 未来的研究中可以尝试对仪器进行改造和算法优化等工作。

微波脑部成像目前存在的问题是会受到无线电频率等因素的干扰, 导致采集的数据、重建的图像不准确。针对这一问题, 可利用系统激励信号源和干扰信号源不相关的特点, 构建新的算法, 对射频干扰进行抑制。除此之外, 少有利用新的技术对压缩感知技术的框架进行改进, 如在算法框架下进行稀疏度逐步增大的递归运算,

可实现高精度重构。在应用方面，可以使用除了稀疏先验技术以外的先验技术，如深度先验、运动目标先验信息挖掘技术等实现高分辨的图像重建。此外，微波诱导热声断层成像和共振(Mr)-光声(PA)-热声(TA)成像技术，实现了新型的医学功能成像方式，解决了单一成像的局限性，但现实生活中的运用还是存在检测设备成本高，检测时间长，稀疏信号处理算法优化不到位等问题。

3 微波在脑部温度探测中的应用

微波除了可用于脑部成像，也可用于脑部的温度探测。根据热力学第二定律其中的一个重要结果，通过辐射平衡方程可得知热力学平衡时，不同物体之间交换的能量是平衡的^[35]。利用这一点，被测物体的热辐射(电磁噪声)可以由天线接收，并通过适当校准转换为被测物温度的测量值。但由于热噪声本身的性质(极低的功率问题，在 37 °C 下为 10^{-14} W/MHz)，直接测量大脑深度温度的侵入性方法还无法应用，造成目前低温神经救援治疗新生儿缺氧缺血性脑病的临床研究受到深脑温度测量困难的阻碍^[36]。

Maruyama 等针对这一测量问题提出了微波探测技术的改进措施，设计了一种辐射计系统，提出了一种获取被测头部温度分布的方法，即利用微波辐射测量法来具体测量大脑局部温度的变化，并利用该技术对脑深部温度测量的精确度进行了估计^[36]。该辐射计采用接触式天线，工作在 1~4 GHz 范围内，根据实际的冷却婴儿头部热模型(图 13)预测的温度分布，获得相应的亮度温度。利用模型拟合和蒙特卡罗技术相结合的方法^[37]，解决了从这组亮度温度中提取温度分布及其精确度估计的问题，如图 14 所示。然而，关于新生儿大脑内的温度分布，或局部或全身降温的影响，现有的数据很少。

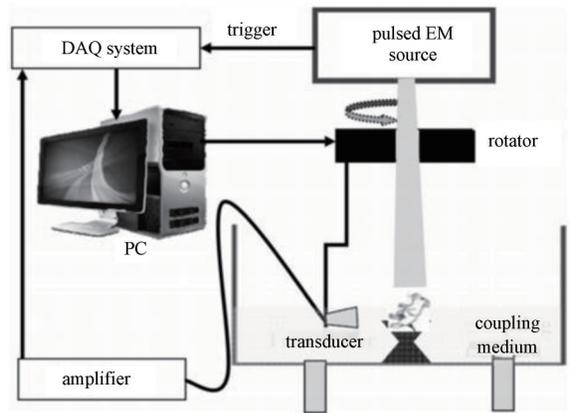


Fig.12 Schematic of the PA/TA imaging systems
图 12 PA/TA 成像系统示意图

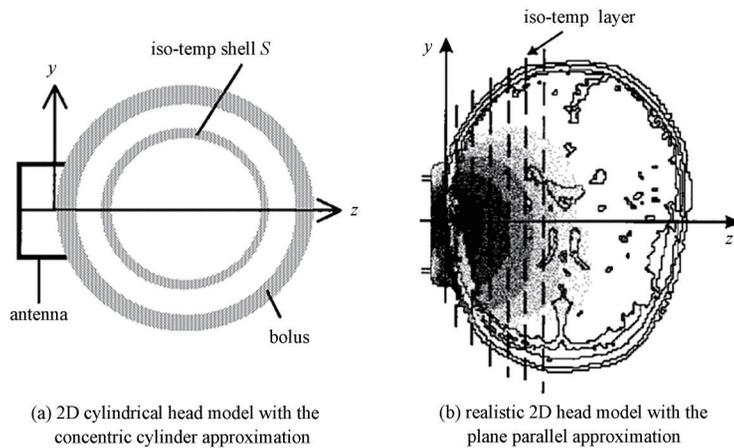


Fig.13 Simplified iso-temperature models for the temperature field in the cooled baby's head
图 13 冷却婴儿头部温度场的简化等温模型

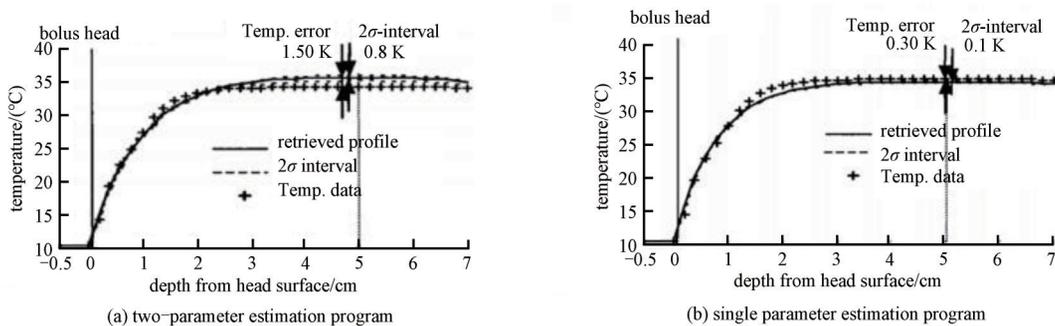


Fig.14 Temperature rise curve
图 14 升温曲线

经过更多参数方面的实验显示,多频微波辐射测量和热模拟技术^[38]仿真对模型参数不准确引起的系统误差,与接收天线和婴儿头部之间的弹丸厚度或颅骨厚度的不确定性相比,组织参数的实际偏差几乎没有影响。这突出表明,在今后实际实施该技术时,需要特别注意接收天线和婴儿头部之间的弹丸厚度或颅骨厚度这些不确定的参数。未来的工作还包括三维权重函数(3D weighting functions)的确定,对冷却婴儿头部内回火温度剖面的替代参数描述,以及该技术的实验演示等。

微波辐射测量法是一种完全被动且绝对安全的非侵入性温度传感和监测的可能替代方法^[39-40],并且是一种可以利用一组微波亮度温度反演温度的新算法^[41]。微波辐射测量法允许耗时的温度分布和加权函数的计算离线进行,从而将反问题的求解简化为超定线性方程组系统的求解;再加上解剖上逼真的婴儿头部模型中的数值模拟,可以从使用多频微波辐射计获得的测量值中快速获得大脑中的温度分布。该算法还可用于对这种测量技术进行误差分析,为无创体温监测提供了依据,适用于低位神经抢救治疗^[42-43]。M Sedankin 等基于此方法开发了一种单通道接触式辐射温度计(图15)^[44],带有一个印刷天线,用于接收3.6 GHz范围内500 MHz频带的微波脑辐射,此平衡辐射计选择Dicke设计的电路作为辐射计的电路^[45]。这种辐射温度计可以在非屏蔽室中操作,得到稳定的温度记录,通过生物医学验证,误差为 ± 0.2 °C,各个头部点的驻波系数(SWR)不超过2。且基于数学模型的研究表明,该系统可以诊断大面积大脑半球的皮层热异常。目前,几乎所有的辐射计都是根据Dicke电路设计的无线电温度计的改进版^[46-48],还没有一种解决方案能够创建一个带有印刷缝隙天线且能平衡辐射的微型辐射温度计,限制了其在医学上的应用。因此,未来如能根据先进的FPIR(Full Polarization Interferometric Radiome)技术研究出抗干扰能力强的微波辐射计,将有机会极大地促进脑部无损探测技术的发展。此外,设备的小型化将使该设备能够与机器人系统相结合,可进一步实现对人体深层信息的无损探测,开拓了先进医疗检测领域的前景。

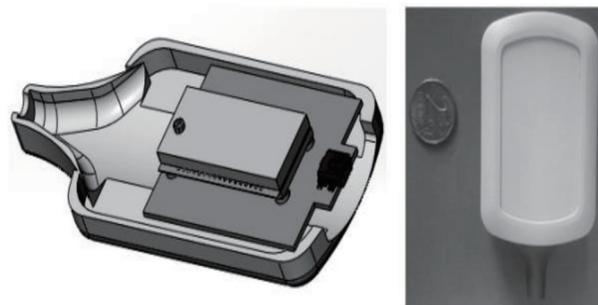


Fig.15 Internal structure and experimental model of micro radiation thermometer
图15 微型放射测温计的内部结构和实验模型

4 总结与展望

本文总结了现有的多种成像方式和系统,对目前成像已解决和还存在的问题进行了分析,并提出改进和未来的展望。

目前已有相关研究利用微波成像技术对大脑水肿、水肿等现象成像的原理进行解释和初步探讨,并展示了微波成像在对大脑探测上具有巨大的潜力。基于微波辐射测量法使用多频率辐射计,加上广泛的权重函数和头部传热的数值模拟,可以对新生儿的深脑温度进行非侵入性监测。该技术是针对低温神经抢救治疗的应用而定制的,其实际实施的优化将依赖于未来的实验数据的可靠性。

此外,微波可能会对人的心理和生理状态产生影响,有研究表明,微波辐射可造成人的空间学习记忆能力下降及海马氨基酸类神经递质含量的改变,但具有可恢复性^[49]。未来的实验可致力于研究微波场远程影响大脑认知功能的实验、可能性记忆机制、主导动机状态和行为内隐性结果的评价,研究结果对医疗康复和心理生理病人的矫治具有重要的现实意义^[50]。

还可以开展微波在简单治疗和安定等方面的实际应用研究,同时想办法减少微波对人体带来的损伤,降低微波的使用成本,追求更高的精确度、更优的计算时间控制,减少躁度,研发出可以排除各种对探测不利因素的算法。

在微波测量设备的更改加工上,如对天线单元高增益、定向辐射、小型化等需求^[51]还待解决与发展。微波成像的适用范围非常广泛,不仅对脑部或是人体,具有非接触测量、检测速度快、灵敏度高、可进行动态检测与实时处理,便于实现遥测与遥控的特点,还可以对土壤/地表状态、水果蔬菜质量、海表温度、大气状态等情况进行探测。在治疗领域,热声成像技术用于对高强度聚焦超声病灶进行监测,引导微波热疗或利用纳米颗粒结合热声对肿瘤进行治疗等。

总之,微波的研究领域是动态的,在各个科学领域都有巨大的潜力,为微波在信息探测上的发展打开了一扇机遇之窗。

参考文献:

- [1] 陈星,黄卡玛,赵翔. 遗传算法应用于二维微波成像研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2002,39(2):261–263. (CHEN Xing, HUANG Kama, ZHAO Xiang. Application of a genetic algorithm on two-dimension microwave imaging[J]. Journal of Sichuan University(Natural Science Edition), 2002,39(2):261–263.)
- [2] 刘志伟,唐丹,结顺利,等. 混合 ACA 和 MLFMA 方法计算复合目标电磁散射[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(4):662–667. (LIU Zhiwei, TANG Dan, JIE Shunli, et al. Calculation of scattering from composite targets by hybrid ACA and MLFMA[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(4):662–667.)
- [3] 吴一戎,洪文,张冰尘,等. 稀疏微波成像研究进展(科普类)[J]. 雷达学报, 2014,3(4):383–395. (WU Yirong, HONG Wen, ZHANG Bingchen, et al. Current developments of sparse microwave imaging[J]. Journal of Radars, 2014,3(4):383–395.)
- [4] 金亚秋. 多模式遥感智能信息与目标识别:微波视觉的物理智能[J]. 雷达学报, 2019,8(6):710–716. (JIN Yaqiu. Multimode remote sensing intelligent information and target recognition: physical intelligence of microwave vision[J]. Journal of Radars, 2019,8(6):710–716.)
- [5] 徐丰,金亚秋. 从物理智能到微波视觉[J]. 科技导报, 2018,36(10):30–44. (XU Feng, JIN Yaqiu. From the emergence of intelligent science to the research of microwave vision[J]. Science & Technology Review, 2018,36(10):30–44.)
- [6] 姜祥奔,姜兴,彭麟,等. 微波用于大脑神经活动检测的新技术[J]. 桂林电子科技大学学报, 2016,36(5):360–363. (JIANG Xiangben, JIANG Xing, PENG Lin, et al. New technology based on microwave for brain neural activity detection[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2016,36(5):360–363.)
- [7] 郑超继,姜兴,李小明,等. 脑神经活动微波探测的模拟实验及安全性分析[J]. 桂林电子科技大学学报, 2019,39(2):98–102. (ZHENG Chaoji, JIANG Xing, LI Xiaoming, et al. Simulation experiment and safety analysis of brain activity detection by microwave[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2019,39(2):98–102.)
- [8] 梁兴东,卜运成,张福博,等. 灾害遥感中 SAR 三维成像技术的研究与应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(1):46–52. (LIANG Xingdong, BU Yuncheng, ZHANG Fubo, et al. Research and application of SAR 3D imaging technology in disaster remote sensing[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(1):46–52.)
- [9] WANG Jingke, JIANG Xing, PENG Lin, et al. Detection of neural activity of brain functional site based on microwave scattering principle[J]. IEEE Access, 2019(7):13468–13475.
- [10] PERSSON M, FHAGER A, TREFNÁ H D, et al. Microwave-based stroke diagnosis making global prehospital thrombolytic treatment possible[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2014,61(11):2806–2817.
- [11] TREFNA H, PERSSON M. Antenna array design for brain monitoring[C]// 2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. San Diego, CA, USA: IEEE, 2008:1–4.
- [12] LI X P, XIA Q, QU D, et al. The dynamic dielectric at a brain functional site and an EM wave approach to functional brain imaging[J]. Scientific Reports, 2014(4):6893.
- [13] SHAO Wenyi, EDALATI A, MCCOLLOUGH T R, et al. A time-domain measurement system for UWB microwave imaging[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018,66(5):2265–2275.
- [14] EBRAHIMI GHIRI R, POURGHORBAN SAGHATI A, KAYA E, et al. A miniaturized contactless UWB microwave system for time-domain dielectric spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017,65(12):5334–5344.
- [15] MOLL J, WCÖRTGE D, KROZER V, et al. Quality control of carbon-rubber tissue phantoms: comparative MRI, CT, X-ray and UWB microwave measurements[C]// 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation(EUCAP). Paris, France: IEEE, 2017:2723–2727.
- [16] 刘腾元,杜宝晨,屈晓斌. 一种低剖面紧耦合超宽带天线设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(2):265–270. (LIU Tengyuan, DU Baochen, QU Xiaobin. Design of a low-profile tightly coupled ultra-wideband antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(2):265–270.)
- [17] 姜兴,康波,李小明,等. 一款应用于脑活动探测的宽带天线系统设计[J]. 电波科学学报, 2017,32(1):32–38. (JIANG Xing, KANG Bo, LI Xiaoming, et al. Design of a broadband antenna system for brain activities detection[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2017,32(1):32–38.)
- [18] CHANDRA R, ZHOU Huiyuan, BALASINGHAM I, et al. On the opportunities and challenges in microwave medical sensing and imaging[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2015,62(7):1667–1682.
- [19] HOPFER M, PLANAS R, HAMIDIPOUR A, et al. Electromagnetic tomography for detection, differentiation, and monitoring of

- brain stroke:a virtual data and human head phantom study[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2017,59(5):86–97.
- [20] YILDIRIM U,DILMAN İ,BILGIN E,et al. Continuous monitoring of hemorrhagic brain strokes via contrast source inversion[C]// 2017 the 11th European Conference on Antennas and Propagation(EUCAP). Paris,France:IEEE, 2017:408–411.
- [21] DILMAN İ, AKINCI M N, ÇAYÖREN M, et al. Differential microwave imaging of the stroke-affected brain via diffraction tomography[C]// 2017 the 25th Telecommunication Forum(TELFOR). Belgrade,Serbia:IEEE, 2017:1–4.
- [22] UKIL A. Denoising and frequency analysis of noninvasive magnetoencephalography sensor signals for functional brain mapping[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012,12(3):447–455.
- [23] 陈天琪,杨浩,杜泽保,等. 用于出血性脑卒中诊断的微波脑部成像仿真[J]. *生物医学工程学杂志*, 2017,34(3):357–364. (CHEN Tianqi,YANG Hao,DU Zebao,et al.A simulation of microwave brain imaging of hemorrhagic stroke detection[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2017,34(3):357–364.)
- [24] 彭艳华,周以国. 一种小型化的对跖 Vivaldi 天线设计[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2021,19(2):261–264. (PENG Yanhua,ZHOU Yiguo. A miniaturized antipodal Vivaldi antenna design[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2021,19(2):261–264.)
- [25] DILMAN S, BILGIN E, COSGUN S, et al. A compressive sensing application on microwave diffraction tomography for the microwave imaging of a stroke affected human brain[C]// 2018 IEEE MTT–S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization(NEMO). Reykjavik, Iceland:IEEE, 2018:1–4.
- [26] CANDÈS E J, WAKIN M B, BOYD S P. Enhancing sparsity by reweighted ℓ_1 minimization[J]. *Journal of Fourier Analysis and Applications*, 2008,14(5):877–905.
- [27] 白佳俊,陈强,陈亮,等. 超材料压缩感知成像技术[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2015,13(4):569–573. (BAI Jiajun,CHEN Qiang,CHEN Liang,et al. Compressive sensing imaging technology based on metamaterial[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2015,13(4):569–573.)
- [28] ZHAO Yuan, SHAN Tianqi, CHI Zihui, et al. Thermoacoustic tomography of germinal matrix hemorrhage in neonatal mouse cerebrum[J]. *Journal of X Ray Science and Technology*, 2020,28(1):83–93.
- [29] ZHAO Yuan, CHI Zihui, HUANG Lin, et al. Thermoacoustic tomography of in vivo rat brain[J]. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2017,10(4):1740001.
- [30] YAN An, LIN Li, LIU Changjun, et al. Microwave-induced thermoacoustic tomography through an adult human skull[J]. *Medical Physics*, 2019,46(4):1793–1797.
- [31] CHI Zihui, LIANG Xiao, WANG Xue, et al. Detection and monitoring of osteoporosis in a rat model by thermoacoustic tomography[J]. *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*, 2020,4(4):234–239.
- [32] HUANG Lin, CAI Wei, ZHAO Yuan, et al. In vivo tumor detection with combined Mr-photoacoustic-thermoacoustic imaging[J]. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2016,9(5):1650015.
- [33] ZHAO Yuan, CHI Zihui, GE Shaoli, et al. Microwave-excited hybrid thermoacoustic and ultrasound imaging with microwave pulse-width modulation[J]. *AIP Advances*, 2019,9(1):015323.
- [34] FADDEN C, KOTHAPALLI S R. A single simulation platform for hybrid photoacoustic and RF-acoustic computed tomography[J]. *Applied Sciences*, 2018,8(9):1568.
- [35] LÜDEKE K M, SCHIEK B, KÖHLER J. Radiation balance microwave thermograph for industrial and medical applications[J]. *Electronics Letters*, 1978,14(6):194–196.
- [36] MARUYMA K, MIZUSHINA S, SUGIURA T, et al. Feasibility of noninvasive measurement of deep brain temperature in newborn infants by multifrequency microwave radiometry[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2000,48(11):2141–2147.
- [37] BIERNACKI R, CHEN S, ESTEP G, et al. Statistical analysis and yield optimization in practical RF and microwave designs[C]// 2012 IEEE/MTT–S International Microwave Symposium Digest. Montreal, QC, Canada:IEEE, 2012:1–3.
- [38] HAND J W, VAN LEEUWEN G M J, MIZUSHINA S, et al. Monitoring of deep brain temperature in infants using multi-frequency microwave radiometry and thermal modelling[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2001,46(7):1885–1903.
- [39] RODRIGUES D B, STAUFFER P R, PEREIRA P J S, et al. Microwave radiometry for noninvasive monitoring of brain temperature [M]// CROCCO L, KARANASIOU I, JAMES M L, et al. *Emerging Electromagnetic Technologies for Brain Diseases Diagnostics, Monitoring and Therapy*. Cham:Springer, 2018:87–127.
- [40] KOSTSOV V S, IONOV D V, BIRYUKOV E Y, et al. Cross-validation of two liquid water path retrieval algorithms applied to ground-based microwave radiation measurements by the RPG-HATPRO instrument[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018,39(5):1321–1342.

- [41] VAN LEEUWEN G M J, HAND J W, VAN DE KAMER J B, et al. Temperature retrieval algorithm for brain temperature monitoring using microwave brightness temperatures[J]. Electronics Letters, 2001,37(6):341–342.
- [42] QIAN P C, BARRY M A, LU Juntang, et al. Transcatheter microwave ablation can deliver deep and circumferential perivascular nerve injury without significant arterial injury to provide effective renal denervation[J]. Journal of Hypertension, 2019,37(10): 2083–2092.
- [43] PEREZ MACHADO A F, PERRACINI M R, CRUZ SARAIVA DE MORAIS A D, et al. Microwave diathermy and transcutaneous electrical nerve stimulation effects in primary dysmenorrhea: clinical trial protocol[J]. Pain Management, 2017,7(5):359–366.
- [44] SEDANKIN M, CHUPINA D, VESNIN S, et al. Development of a miniature microwave radiothermograph for monitoring the internal brain temperature[J]. Eastern–European Journal of Enterprise Technologies, 2018,3(5):26–36.
- [45] DICKE R H. The measurement of thermal radiation at microwave frequencies[M]. SULLIVAN W T. Classics in Radio Astronomy. Dordrecht:Springer, 1982:106–113.
- [46] GUDKOV A G, LEUSHIN V Y, VESNIN S G, et al. Studies of a microwave radiometer based on integrated circuits[J]. Biomedical Engineering, 2020,53(6):413–416.
- [47] CETINDOGAN B, USTUNDAG B, TURKMEN E, et al. A D–band SPDT switch utilizing reverse–saturated SiGe HBTs for dicke–radiometers[C]// 2018 11th German Microwave Conference(GeMiC). Freiburg, Germany:IEEE, 2018:47–50.
- [48] GALAZIS C, VESNIN S, GORYANIN I. Application of artificial intelligence in Microwave Radiometry(MWR)[C]// Proceedings of the 12th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies. Prague, Czech Republic: SciTePress, 2019: 112–122.
- [49] 孙成峰, 赵黎, 胡少华, 等. 微波辐射对大鼠学习记忆功能和海马相关神经递质的影响[J]. 中国体视学与图像分析, 2012,17(1): 61–64. (SUN Chengfeng, ZHAO Li, HU Shaohua, et al. Effects of microwave radiation on learning and memory and neurotransmitters in the hippocampus of rats[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2012,17(1):61–64.)
- [50] GURKOVSKIY B V, ZHURAVLEV B V, ONISHCHENKO E M, et al. Techniques and instrumental complex for research of influence of microwaves encoded by brain neural signals on biological objects' Psycho physiological state[J]. IOP Conference Series:Materials Science and Engineering, 2016,151(1):012019.
- [51] 俞鲜容, 孙逢圆, 王波, 等. 一款应用于微波探测脑中风的天线设计[J]. 微波学报, 2021,37(3):29–34. (YU Xianrong, SUN Fengyuan, WANG Bo, et al. Design of an antenna for microwave detection of stroke[J]. Journal of Microwaves, 2021,37(3): 29–34.)

作者简介:

蒋廷锋(2000–), 男, 在读本科生, 主要研究方向为微波探测 .email:TingfengJ110111@163.com.

叶菁华(1991–), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为微波加热、微波探测及微波能应用.

施开波(1983–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为神经网络、人工智能技术及类脑信息探测.

朱铎丞(1986–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为微波加热、多物理场计算及微波能应用.

(上接第1123页)

作者简介:

张广磊(1985–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为雷达系统设计、阵列信号处理 .email:glei_zhang@163.com.

单蛟龙(1989–), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为阵列信号处理.

陈峰峰(1989–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为阵列信号处理.

莫修辞(1981–), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为雷达系统设计、阵列信号处理.