

平面螺旋微波热疗天线的分析与仿真

杜永兴¹ 席晓莉¹ 吴道澄²

(1.西安理工大学 自动化与信息工程学院 陕西 西安 710048;

2. 西安交通大学 生物医学信息工程教育部重点实验室 陕西 西安 710038)

摘 要 本文针对人体肌肉组织微波热疗模型,采用有限元数值分析方法对阿基米德天线产生的电磁场分布及单位质量电磁能量吸收率(SAR)进行了模拟计算。比较了阿基米德天线的螺旋匝数,匝间距和螺旋线直径对天线的性能的影响。在此基础上,设计了一种对自身参数和输入频率的波动都不太敏感的热疗天线。

关键词 微波热疗 阿基米德螺旋 有限元法 SAR

The Analysis and Simulation of Planar Spiral Antenna for Microwave Hyperthermia

DU Yong-Xing¹ XI Xiao-Li¹ Wu Dao-Cheng²

(1.School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Shanxi, Xi'an, 710048;

2. The Key Laboratory of Biomedical Information Engineering of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Shanxi, Xi'an, 710038)

Abstract: The finite element method was used to simulate the distributions of the electromagnetic fields and the specific absorption rate (SAR) of the Archimedes planar spiral antenna in phantom muscle tissues. The factors that affect the antenna performance are compared. These factors include spiral wire's diameter, space of adjacent spiral circle and circle numbers. A new microwave hyperthermia antenna which is not sensitive to neither its parameters nor the inputting frequency's fluctuation is presented in this paper.

Key words: microwave hyperthermia, Archimedes spiral, the finite element method, the specific absorption rate

1. 引言

微波热疗技术已在很多疾病的临床治疗中的到应用,如肿瘤的热疗、热凝止血和异常增生组织的凝固等。事实证明在有些场合微波是比其它方法更为理想的治疗手段^[1]。微波临床设备简单,费用低,安全有效,并发症少,操作方便,剂量容易得到控制,它与药物治疗相比,副作用小。故而有着广泛的发展前景。

设计高效安全的微波热疗天线是微波热疗效果优劣的关键。而与一般天线不同的是医用微波热疗天线作用于近场区。复杂的边界问题使天线的近场区求解十分困难,所以常用数值计算的方法来解决。

平面阿基米德螺旋天线因其具有结构紧凑,尺寸小,重量轻的特点,作为微波热疗天线被研究和应用^[2]。

本文发现工作在 2.45GHz 时,可以找到很多反射系数比较小的天线。但是部分天线对螺旋的参数和工作频率的波动非常敏感,在分析了造成这种情况的原因的基础上,比较了平面螺旋天线的圈数,螺旋线之间的距离和螺旋线的直径对天线的反射系数造成的影响。设计了对螺旋的参数以及工作频率的波动都不敏感的背腔式平面阿基米德螺旋热疗天线。

2. 天线的设计

2.1 天线模型

设计的背腔式螺旋天线的形状如图 1a 所示,同轴输入线的内导体与阿基米德螺旋天线焊接在一起,背腔与同轴线外导体连接。同轴线的内外导体直径分别为 0.9mm 和 3.0mm,内外导体间为 Teflon 材料,相对介电常数为 2.1。背腔半径为 22 mm,腔体高为 3mm。螺旋天线顺时针旋转。

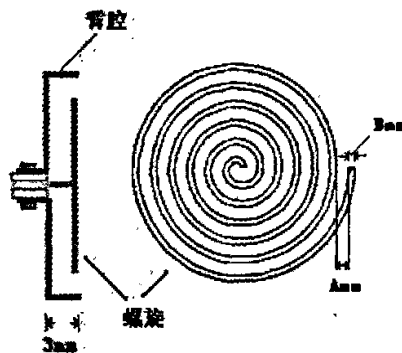


图 1 天线示意图

2.2 人体组织模型

人体组织选择三维腔体结构如图 2。天线工作在 2.45GHz 时,组织的介电常数和电导率为 $\epsilon_r=47$, $\sigma=2.17$ S/m^[3]。

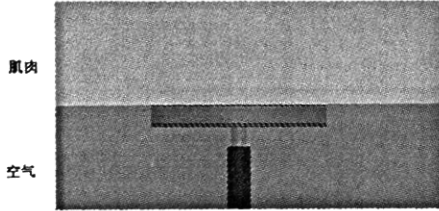


图 2 天线的工作模型取YOZ剖面图

3. 天线的数字仿真

3.1 电磁场分布的计算

计算采用 ANSOFT 公司的高频结构仿真 HFSS 9.2 软件。源的频率为 2450 MHz, 加在辐射天线的输入端口, 功率为 1W。设同轴线外导体面为理想导体面, 肌肉组织为无限大。采用自适应求解过程, 迭代次数设为 6, 每次计算要比前次计算所剖分的网格数增加 20%, 2 次计算得到的 S 参数的幅度和相位改变量小于 20%或计算满 6 次, 则求解结束。计算所得的 S 参数反映了输入端口能量的反射和能量的利用率。

3.2 SAR 分布的计算

采用三维有限元方法对电磁场分布进行数值计算, 并求解天线输入端口的 S 参数。由式 1 得出 SAR 的分布。

$$SAR(w/kg) = \frac{\sigma}{2\rho} |E|^2 \quad (1)$$

式中 ρ 和 σ 分别表示组织的密度和电导率, $\rho=1.05g/cm^3$, $\sigma=2.2$ 。辐射天线导体的 SAR 均按 0 计。

4. 计算结果

我们可以找到很多参数不同但能量反射比较小的天线, 如图 3 中螺旋圈数(下文用 N 来表示)为 6 圈, 螺旋线的直径(下文用 B 来表示)为 0.2mm, 螺旋圈之间的距离(下文用 A 来表示)为 2mm 时, S_{11} 为 0.19, 但是当 B, N 不变, 把 A 大小改变 $\pm 0.2mm$, 天线的 S_{11} 会急剧恶化, 分别为 0.52 和 0.81。并且从图 1 中可以看出, 如果频率变化到 2.4GHz 时, 对于 A 为 2mm, N 为 6 圈, B 为 0.2mm 的螺旋天线来说, S_{11} 会从 0.19 变化到 0.41。以上分析说明虽然有些天线能得到较好的 S_{11} 值, 但是它对天线自身的参数, 以及天线的工作频率非常敏感, 可能导致天线性能的突变, 这样就对天线的机械加工技术以及天线的工作频率波动

范围的大小要求比较高。造成这种突变的原因是, 天线的 S_{11} 值对于频率来说, 变化率比较大。考虑到平面阿基米德螺旋天线具有宽频带的特性, 如果使天线的工作频率在天线的宽频带范围之内, 则天线对工作频率的波动和天线的参数变化都不敏感。

表 1 螺旋天线在不同的尺寸时 f_{min} 和 S_{11} 值

A (mm)	B (mm)	N	f_{min} (GHz)	S_{11}
2	0.4	6	>6	0.92
		7	4.5	0.91
		10	3.5	0.38
1.5	0.4	6	2.4	0.44
2			3	0.35
1.4			4	0.89
2	0.4	6	2.8	0.18
	0.8		2.8	0.22
	1.6		3.1	0.81
2.8	1	6	1.3	0.11
3			1.4	0.12
3.2			1.6	0.13

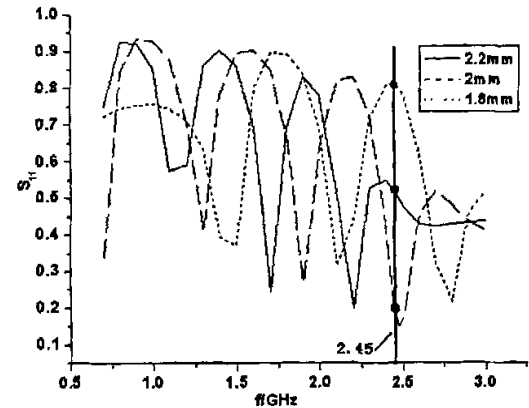
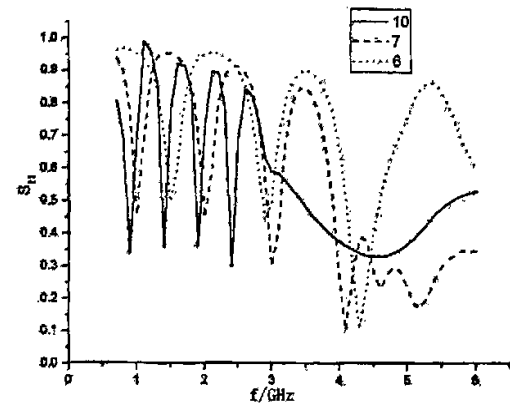


图 3 随频率变化的 S_{11} 值 (B=0.2mm, N=6, A=2.2mm, 2mm and 1.8mm)

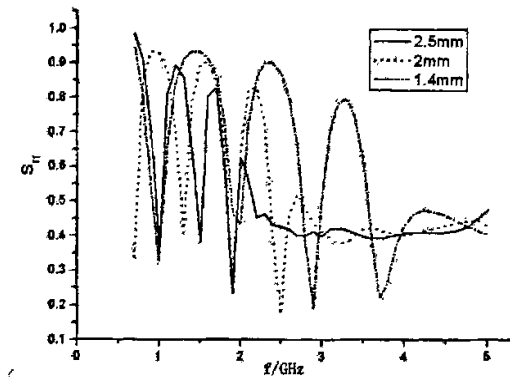
如图 4 (c) 所示, 相对于频率有 S_{11} 变化比较剧烈的和 S_{11} 变化比较缓慢的两个区域, 把 S_{11} 变化剧烈的区域叫振荡区, 变化缓慢的区域叫平坦区。平坦区的最低频率叫 f_{min} 。从图 4 (a) 和表 1 可以看出, f_{min} 随天线的圈数的增加逐渐降低, 6 圈时 f_{min} 要大于 6GHz, 7 圈时 f_{min} 大概在 4.5GHz, 而 10 圈时 f_{min} 就到了 3.5GHz 左右。

从图 4 (b) 和表 1 中可以看出天线的 f_{min} 会随着天线

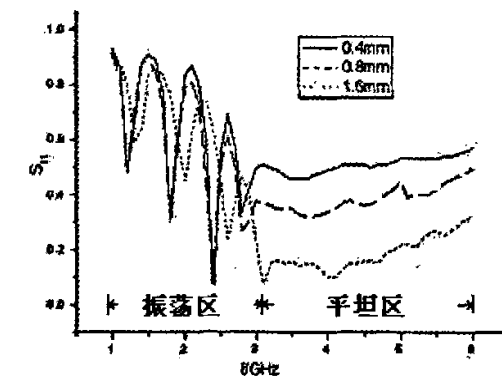
螺旋之间的距离的增加而降低, 旋距是 1.4mm 时 f_{min} 在 4GHz 左右, 旋距是 2mm 时, f_{min} 在 3GHz 左右, 旋距是 2.5mm 时, f_{min} 大概在 2.4GHz。



(a) 随频率变化的 S_{11} 值 ($A=2\text{mm}$, $B=0.4\text{mm}$, $N=6, 7, 10$)



(b) 随频率变化的 S_{11} 值 ($N=6$, $B=0.4\text{mm}$, $A=2.5\text{mm}, 2\text{mm}, 1.4\text{mm}$)



(c) 随频率变化的 S_{11} 值 ($N=6$, $A=2\text{mm}$, $B=0.4\text{mm}, 0.8\text{mm}, 1.6\text{mm}$)

图4 改变天线参数时的 S_{11} 值

从图 4 (c) 和表 1 中可以看出螺旋线的直径对天线的 S_{11} 值的影响, S_{11} 随螺旋线的直径的增加而降低。但对天线

的 f_{min} 影响不大。

根据以上分析的结果, 要想使天线在工作频率下对参数和频率波动不敏感, 则需使天线的工作频率在天线 S_{11} 的平坦区变化, 如果 S_{11} 值在振荡区, 可以增加天线的 A 和 N, 要减小 S_{11} 值, 可以增加 B 值。

设计出天线的参数为, $A=3\text{mm}$, $B=1\text{mm}$, $N=6$ 圈。此时天线的 S_{11} 值为 0.123。由图 5, 比较了天线的 A 大小变化 0.2mm 时天线 S_{11} 的变化, 可以看出天线在 2.45GHz 的工作频率下, 天线自身的参数对天线的 S_{11} 影响已经很小, 分别为 0.115 和 0.131。而且从图中可以知道, 天线的频率波动在 $\pm 50\text{MHz}$ 时, 天线的 S_{11} 的波动为 ± 0.05 。

由辐射天线的 SAR 分布和电场分布 (见图 6 和图 7) 可以看出由于背腔的作用, 使天线的能量全部朝向组织内辐射, 基本没有能量泄漏。并且在 SAR 为 100W/kg 时天线的辐射深度在 12—13mm, 越接近天线 SAR 值越大。由距离天线表面 5mm 的 XY 面的 SAR 分布 (见图 7) 可以看出, 天线的能量在组织中的分布基本呈圆形, 并且距圆心越近 SAR 值越高。

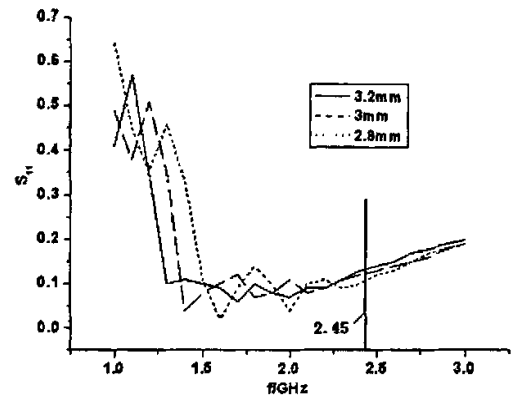


图5 设计的天线随频率变化的 S_{11} 值 ($N=6$, $B=1\text{mm}$, $A=2.8\text{mm}, 3\text{mm}, 3.2\text{mm}$)

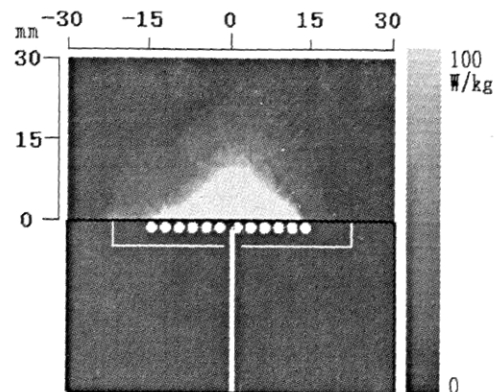


图6 辐射天线的 SAR 分布

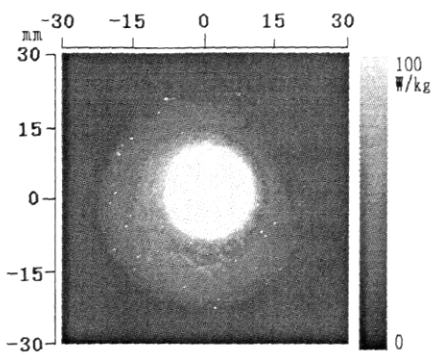


图7 辐射天线距离组织表面5mm深度的SAR分布图

5. 结论

对于平面阿基米德螺旋热疗天线, 增加螺旋之间的距离和增加螺旋的圈数都能使天线的宽带的最低频率降低, 也就是天线的外径变大可以使天线的宽带的最低频率降低。而增加天线的直径能使天线的 S_{11} 值下降。如果在 2.45GHz 工作频率下, 天线的 S_{11} 值处于宽带之内, 则天线对工作频率的波动和天线的参数变化一般不太敏感。

参考文献

- [1] 卓大宏, 热疗法的几个新问题. 中华理疗杂志. 1978, 1(2), 110
- [2] 高蕴雅 缪毅强 钱鸿森. 医用外照射微波辐射器的改进和临床应用. 红外与毫米波学报. 2001, 20(2), 143-146
- [3] 李鼎九, 胡自省, 钟毓斌. 肿瘤热疗学. 2003, 151-152
- [4] S. Jacobsen, P. R. Stauffer, D. G. Neuman. Dual-Mode Antenna Design for Microwave Heating and Noninvasive Thermometry of Superficial Tissue Disease.

IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2000, 47(11), 1500-1509

- [5] S. Jacobsen, H. O. Rolfsnes, P. R. Stauffer. Characteristics of Microstrip Muscle-Loaded Single-Arm Archimedean Spiral Antennas as Investigated by FDTD Numerical Computations. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2005, 52(2), 321-330
- [6] Nakano H, Nogami K, Arai S, Mimaki H, Yamauchi J. A spiral antenna backed by a conducting plane reflector[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1986 34(6): 791-796
- [7] Xi XL, Wang WB. Modeling of interstitial applicators used for microwave hyperthermia of bone cancer based on subgridding FDTD method[A]. The 6th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. 2003, 645-648
- [8] H. O. Rolfsnes, P. F. Maccarini, S. Jacobsen, P. R. Stauffer. Design of Spiral Antennas for Radiometric Temperature Measurement. Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS. 2004, 2522-2525

作者简介:

席晓莉 女, 1967年出生, 陕西人, 副教授, 1990年获国防科技大学应用物理专业学士, 2004年获西安交通大学电磁场与专业技术工学博士。近年主要从事电波传播、天线设计、电磁场数值计算等领域的研究工作。E-mail: xixiaoli@xaut.edu.cn

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>