

文章编号 1005-0388(2005)03-0386-04

用于生物组织电特性重建的探头研究*

闫丽萍 黄卡玛 刘长军

(四川大学电子信息学院, sherry_yan@163.com, 四川 成都 610064)

摘要 对适用于分层生物组织电特性重建的宽带同轴贴片探头进行了研究。采用时域有限差分(FDTD)法分析了同轴贴片探头在三层生物组织中的场分布,结合遗传算法(GA)优化了探头的尺寸。优化设计出的圆形同轴贴片探头具有轴对称特点,辐射近场在生物组织中透入深、分布集中,反射系数的频率响应特性好,适用于局部分层生物组织电特性的重建,实验证明探头的设计优化是正确的。

关键词 探头, 时域有限差分法(FDTD), 遗传算法(GA)

中图分类号 TN822⁺.4; TN813 文献标识码 A

Optimum design of probe for electric properties reconstruction of tissues

YAN Li-ping HUANG Ka-ma LIU Chang-jun

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University,
sherry_yan@163.com, Chengdu Sichuan 610064, China)

Abstract A wide-band patch probe fed by coaxial line is used for reconstruction of electric properties of layered tissues. The field distribution of a patch probe in three-layer tissues is analyzed by the finite difference time domain (FDTD) method, and the optimum design of the probes is performed by using genetic algorithm (GA). As a result, a circle patch probe with symmetrical structure is designed in this paper. This probe can penetrate layered tissues deeply and concentrate in a small region and is suitable for reconstruction of electric properties of local layered tissues. The simulation results are in good agreement with experimental results.

Key words probe, finite difference time domain (FDTD), genetic algorithm (GA)

1 引言

正常组织与病态组织间的电特性差别非常大,对组织的电特性进行重建将为疾病的早期诊断、生理活动的监测等提供可靠的依据。在生物活体组织电特性的重建中,测量探头的辐射特性起着决定性的作用。针对目前电阻抗成像(EIT)分辨率低^[1]、微波成像技术复杂且系统成本高^[2],开口同轴探头只能获得组织整体等效电特性的缺点^[3],采用了基于生物分层均匀组织模型的电特性无损测量方法。

在局部小区域内,把生物组织近似为分层均匀组织,通过测量和重建获得组织的等效电特性。因此,设计适合的测量探头,使生物组织内部的辐射近场集中于局部成为该方法的关键。

常用的开口同轴探头无法透入生物组织内部^[4],而内导体延长的同轴探头无法与生物组织进行无损良好接触^[5],波导型探头频带很窄^[6],因此本研究提出了一种透入深、场强集中的同轴贴片探头,能够在宽频带内把微波信号辐射到生物皮下分层组织内部。采用 FDTD 数值方法与 GA 相结合,优化

了贴片探头的尺寸,并进行了实验验证。

2 探头的结构

探头在组织中的辐射近场必须集中、透入深,为无损测量探头。在开口同轴探头上添加贴片结构,既延长了内导体长度增强了辐射,易与皮肤接触,又具有宽频带响应的优点,可以为电特性重建提供大量的测量信息。

同轴贴片型探头的结构如图1所示。同轴线内导体延长与贴片连接在一起,延长的内导体半径为 r_{ap} ;外导体与贴片结构的接地板相连接。本研究分析了两种不同形状的贴片结构——圆形与十字形,尺寸如图1所示。

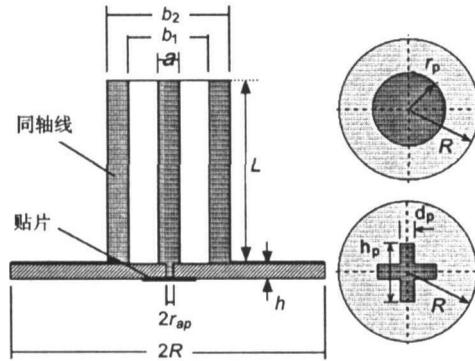


图1 同轴贴片探头结构示意图

3 探头的FDTD模拟与优化设计

3.1 FDTD数值模拟

采用FDTD法模拟分层均匀组织中的场分布。选用皮肤、脂肪和肌肉三层组织进行计算。皮肤厚度0.5mm,脂肪厚度3.0mm,肌肉取为半无限大空间。组织的介电特性模型采用四阶Cole-Cole方程^[7]:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + \sum_{m=1}^4 \frac{\Delta\epsilon_m}{1 + (j\omega\tau_m)^{1-\alpha_m}} + \frac{\sigma_j}{j\omega\epsilon_0} \quad (1)$$

式中, ϵ_0 为自由空间中的介电常数, ω 为角频率, ϵ_{∞} 为频率无限大时的介电常数, $\Delta\epsilon$ 为静态介电常数与频率无限大时的介电常数的差值, τ 为驰豫时间, α_m 为常数, σ_j 为组织自身的电导率(S/m)。对于皮肤、脂肪和肌肉,各参数所对应的值见文献^[7]。

对于十字形贴片,计算采用三维直角坐标系,而对于圆形贴片,由于该结构具有轴对称的特点,因此选用二维圆柱坐标系。考虑到同轴线尺寸及皮肤的厚度,空间步长 $\Delta s = 0.5$ mm,对应的时间步长为 8.3×10^{-13} s。计算中贴片基底半径 $R = 1.5$ cm,吸收

边界采用二阶Mur吸收边界。

3.2 探头的优化设计

为了使探头在分层生物组织中的近场分布集中、透入深,以满足分层均匀组织模型的需要,采用基于小生境技术的遗传算法对探头的结构尺寸(包括延长内导体的长度、半径、贴片的尺寸)进行了优化。遗传算法中,适应度函数的定义如下:

$$F = \exp \left(-\alpha_1 \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_{11}|_i \right)^2 - \alpha_2 \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1/d_i) \right)^2 \right) \quad (2)$$

式中, α_1 、 α_2 分别为常数,取值 10, $|S_{11}|_i$ 为探头在第 i 个频点的反射系数模值, d_i 为相应频点的透入深度(定义为垂直于探头轴线的面上功率密度与入射功率密度相比衰减 20dB 时对应的生物组织的深度), $n=11$, 为从 2GHz~7GHz 范围内所选取的频率点数。

优化结果表明,当同轴线尺寸为: $r_a = 1.5$ mm, $r_{bl} = 5.0$ mm, $r_{le} = 8.0$ mm 时,圆形贴片的优化尺寸为:延长内导体的半径 $r_{ap} = 0.5$ mm,长度 $h = 2.0$ mm,贴片的半径为 2.5mm。十字形贴片的长度 $h_p = 4.0$ mm,宽度 $d_p = 1.0$ mm,其余同圆形贴片。

图2~4给出了频率 $f = 3$ GHz,输入功率为 1mW 时开口同轴线与上述两种贴片探头分别在肌肉中的电场总场分布。可以看出,贴片型探头与终端开口同轴线相比,辐射近场透入组织内部的能力大大提高。其中圆形贴片探头在肌肉组织中的近场透入最深且分布相对集中。

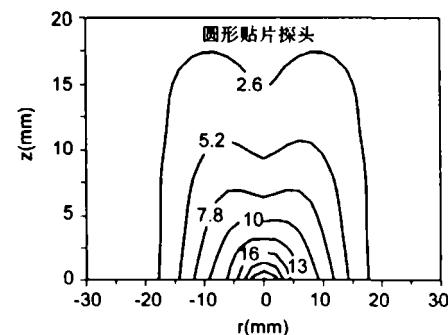


图2 终端开口同轴线探头在肌肉中的电场总场分布, $f = 3$ GHz

表1比较了输入功率为 1mW 时三种探头与生物组织接触时的反射系数 $|S_{11}|$ 与透入深度 d 随频率的变化。这里透入深度是从皮肤开始的厚度,其中皮肤厚度为 0.5mm,脂肪厚度为 3mm。由表可以看出:贴片型探头反射系数与透入深度随频率的

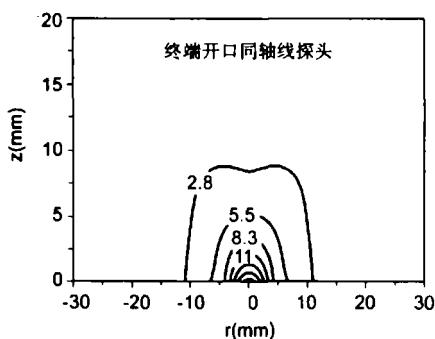


图 3 圆形贴片探头在肌肉中的电场总场分布, $f=3\text{GHz}$

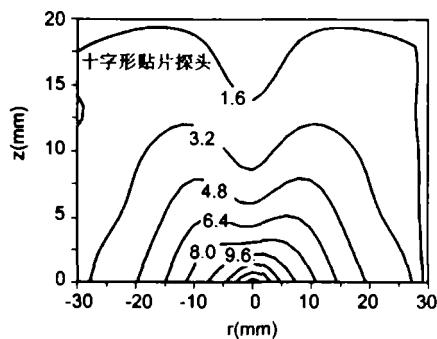


图 4 十字形贴片探头在肌肉中的电场总场分布, $f=3\text{GHz}$

变化非常明显,这些对于分层组织电特性的重建是非常有利的。

表 1 三种探头的反射系数 $|S_{11}|$ 与透入深度 d 的比较

| 频率 f (GHz) | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 | 6.0 |
|-----------------|------|------|------|------|------|
| A | 0.88 | 0.86 | 0.84 | 0.83 | 0.81 |
| $ S_{11} $ B | 0.80 | 0.66 | 0.49 | 0.32 | 0.22 |
| C | 0.68 | 0.60 | 0.53 | 0.46 | 0.32 |
| d (mm) | 2.99 | 3.47 | 3.51 | 4.02 | 5.03 |
| A | 8.53 | 11.0 | 10.6 | 9.01 | 8.00 |
| C | 5.55 | 10.0 | 11.5 | 11.0 | 9.08 |

A 终端开口同轴线, B 圆形贴片, C 十字形贴片

4 实验验证

根据上面的优化结果, 分别加工了同轴线和贴片两部分结构, 将两部分焊接在一起构成贴片型探头进行实验。使用安捷伦 E8363B 矢量网络分析仪测量了以上两种贴片探头以及终端开口同轴线在 1% 盐水中的透入深度, 并与计算结果进行了比较 (见图 5、图 6)。透入深度是采用如下方法确定的: 在 1% 盐水中用一块金属板逐渐远离探头终端, 观

察探头反射系数的变化, 反射系数不变化时所对应的金属板到探头的距离, 即为透入深度。

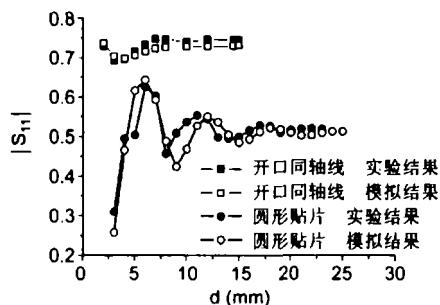


图 5 开口同轴线与圆形贴片探头在 1% NaCl 溶液中反射系数与探测深度的实验结果与模拟结果比较

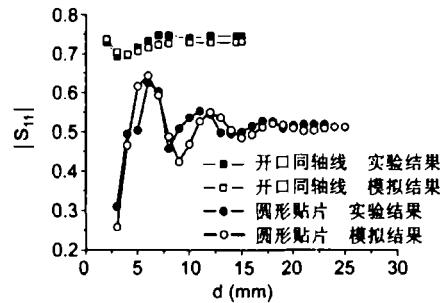


图 6 十字形贴片探头在 1% NaCl 溶液中反射系数与探测深度的实验结果与模拟结果比较

由图 5 与图 6 可以看出, 圆形贴片探头的透入深度最深, 大约为 20mm, 实验结果与计算结果基本吻合。误差产生的主要原因: 1) 贴片与同轴线焊接不良, 使贴片与同轴线之间出现空气层或者焊接时有杂质渗入; 2) 贴片尺寸尤其是十字形贴片尺寸不是很精确; 3) 采用直角坐标系计算圆柱结构。

5 结论

针对常用开口同轴探头与波导型探头的不足, 研究了适用于分层均匀组织电特性重建的同轴贴片探头。FDTD 分析结果表明, 优化后的圆形同轴贴片探头在生物分层组织中的近场透入深、集中、具有轴对称结构和宽频带响应的优点, 这对于分层均匀组织电特性的重建具有很大的优势。实验结果也表明圆形贴片探头优于其他两种探头。并且实验结果与模拟结果相吻合, 表明该研究的 FDTD 模拟和 GA 优化设计是有效的。

参考文献

- [1] Smith, D G *et al.*. In vivo measurement of tumor conductiveness with the magnetic bioimpedance method [J]. IEEE Trans. Biom. Eng., 2000, 47(10): 1403~1405.
- [2] Berude, D *et al.*. A comparative study of four open-ended coaxial probe models for permittivity measurement of lossy dielectric/biological materials at microwave frequencies [J]. IEEE Trans. MTT, 1996, 44(10): 1928~1934.
- [3] Yoon, R S, *et al.*. Changes in the complex permittivity during spread depression in rat cortex [J]. IEEE Trans. Biom. Eng., 1999, 46(11): 1330~1338.
- [4] M Okoniewski, J Anderson, *et al.*. Further analysis of open-ended dielectric sensors [J]. IEEE Trans. MTT, 1995, 43(8): 1986~1989.
- [5] 张敏, 黄卡玛, 等. 腐蚀性溶液介电常数测量的探头研究[J]. 电波科学学报, 2001, 16(3): 409~413.
M Zhang, K M Huang, *et al.*. Analysis of open-ended coaxial line for measuring permittivity of corrosive solution[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16(3): 409~413.
- [6] 王亦方, 胡斌杰, 崔芙蓉, 等. 用于人体皮下肿瘤探测的优化喇叭探头[J]. 电波科学学报, 2000, 15(2): 208~212.
Y F Wang, B J Hu, F R Cui, *et al.*. Optimum horn probe for detecting human body's subcutaneous tumor [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2000, 15(2): 208~212.

- [7] Camelia Gabriel, Sami Gabriel. Dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies [EB]. Physics Department, King's College London, London WC2R 2LS, UK, [EB/OL]. <http://www.brooks.af.mil/AFRL/HED/hedr/reports/dielectric>Title>Title.html>.



闫丽萍 (1972—), 女, 河北人, 四川大学副教授、博士, 近年来主要从事电磁场数值计算和生物电磁学方面的研究工作。



黄卡玛 (1964—), 男, 重庆人, 1991年毕业于电子科技大学, 获博士学位。现为四川大学教授、博士导师。近年来主要从事微波化学和生物电磁学方面的研究工作, 先后在国内外发表论文一百余篇, 并多次获省部级奖。

- 刘长军 (1973—), 男, 河北人, 四川大学副教授, 博士, 主要从事电磁兼容和生物电磁学方面的研究工作, 先后在国内外期刊上发表论文二十多篇。