优化的贴片型测量探头及其生物医学应用研究*

闫丽萍⁴ 黄卡玛 刘长军 王成蓉

(四川大学 电子信息学院,成都 610064)

摘要 采用时域有限差分(FDTD)法结合遗传算法(GA)优化设计了适用于浅表生物组织高频测量的宽带同轴贴片探头,并用该探头测量了人体背部1~7 GHz频带内的反射特性。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、反射系数的频率响应特性好。所获得的人体背部反射特性的测量结果将为背部浅表组织电特性的重建提供有利的依据。

关键词 探头 贴片 时域有限差分(FDTD)法 遗传算法(GA) 人体

Study on An Optimized Patch Probe and Its Biomedical Application

Yan Liping Huang Kama Liu Changjun Wang Chengrong

(College of Electronics and Information Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract A wide-band patch probe excited by coaxial line, which is useful for noninvasive measurement of superficial tissues at high frequencies, is presented in this paper. Optimization of the probe is performed by genetic algorithm (GA) combined with Finite Difference Time Domain (FDTD). Then the optimized round patch probe is used to measure reflection coefficient for $1 \sim 7$ GHz. The measured results show some interesting phenomena, which are very useful for reconstruction of electric properties of superficial tissues.

Key words Probe Patch Finite Difference Time Domain (FDTD) Genetic algorithm (GA) Human body

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。如何设计合适的宽频带无损测量探头,使辐 射近场集中于局部小范围内以获得某个局部的精确 测量,并且能够透入生物组织内部较深处成为测量 的关键。常用的无损测量探头有终端开口同轴线和 波导两种。终端开口同轴探头具有测量频带宽的特 点,但电磁场集中在内外导体之间,无法透入皮下组 织内部^[1,2],而波导型探头虽然能透入生物组织内 部,但测量频带非常窄,因此无法获得宽频带特 性^[3],而这对于生物组织电特性重建所需的大量信 息是不利的^[4]。

我们提出了一种透入深、场强集中的同轴激励 贴片探头,能够在宽频带内把微波信号辐射到生物 皮下分层组织内部较深处,获得内部生物组织的测 量信息。采用FDTD数值方法与GA相结合,优化了 该贴片探头的尺寸,并利用该探头测量了人体背部 在1~7GHz范围内的反射特性。

2 测量探头的结构

探头要求在组织中的辐射近场必须集中、透入 深,且为无损测量探头。因此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,又具有 宽频带响应的优点,且易与皮肤接触,可以进行无损 测量获得宽频带范围的信息。同轴贴片型探头的结 构如图1所示。贴片为圆形,半径为rp,基板半径为 R。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rap;外导体与贴片结构的接地板相连接。

3 探头的优化设计

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 0.5 mm,脂肪厚度 3.0 mm,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^[5]:

$$\boldsymbol{\xi} \ \boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{o}} + \bigoplus_{m=1}^{4} \frac{\Delta \boldsymbol{\xi}_{m}}{1 + (j \ \boldsymbol{\omega} \boldsymbol{\tau}_{m})^{(1-\alpha_{m})}} + \frac{\boldsymbol{\sigma}}{j \ \boldsymbol{\omega} \boldsymbol{\varepsilon}} \qquad (1)$$

(色)的存着20至4°Chihar X cademic Pournal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

^{*} 国家自然科学基金资助课题(60471045); 教育部博士点基金 资助项目(20040610019)和四川大学青年基金资助

式中: ϵ 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 为常数; φ 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[5]。该结构 具有轴对称特点, 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 $\Delta = 0.5 \text{ mm}$, 对应的时间步长 $\Delta = 8.3 \times 10^{-13} \text{ so}$ 贴片基底半径 R = 1.5 cm, 吸收边界采用二阶 Mur 吸收边界。



图1 同轴贴片探头结构示意图

Fig 1 The structure of patch probe coaxially fed

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,本文采用小种群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:



式中: α、α分别为常数, 取值 10; Γ_i 为探头的反射系数; di 为透入深度(定义为垂直探头轴线的面上的功率流密度与入射功率相比衰减 20 dB 时对应的生物组织的深度); n = 11, 为从 2~7 GHz 范围内所选取的频率点数。

优化结果表明,当同轴线尺寸为:a = 1.5 mm, $b_1 = 5.0 \text{ mm}$, $b_2 = 8.0 \text{ mm}$ 时,圆形贴片的优化尺寸 为:延长内导体的半径 $r_{ap} = 0.5 \text{ mm}$,长度 h = 2.0 mm,贴片的半径 $r_p = 2.5 \text{ mm}$ 。

图2给出了两种探头与三层生物组织接触时的 反射系数 Sin 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0.5 mm,脂肪厚度为3 mm。由图2可以看出,圆形贴片 探头与开口同轴探头相比在肌肉组织中的近场透入 深,反射系数随频率的变化也最明显,这些对于生物 组织电特性的重建是非常有利的。

4 人体背部浅表组织高频反射特性的测量

使用上述优化探头,测量了人体背部不同位置的反射系数。测量所用仪器为安捷伦E⁸³⁶²B 矢量网络分析仪,测量频率范围为1~7 GHz,记录频点数为801个点。测量时,圆形贴片探头紧压在人体背部,与人体背部紧密接触,以保证人体与探头之间没有气隙,从而减小接触不良引起的测量误差。



图 2 两种探头反射系数与透入浓度随频率的变化

(a) 两种探头透入深度的比较;(b) 两种探头反射系数的比较

Fig 2 Variations of refection coefficient and penetration depth with respect to frequency

(a) the penetration depth of circle patch compared with open-ended line, (b) the reflection coefficient of circle patch compared with open-ended coaxial line

为了方便定标,测量时选择了 8 位身材相近的 横向每隔1.5 cm 确定一个点,纵向每隔2 cm 确定一成年男性作为样本,每位样本背部测量相同的点数。 个点。考虑到脊柱部位不平,无法保证探头与皮肤组 (C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

织紧密接触,因此以脊柱为中心,分别在脊柱两边取 相同的点数。从背部到腰部,测量点数逐渐减少,每 位样本背部共有460个点。测量前,先将这些点标记 出,然后再进行测量。

经编程处理后,提取出了1~7 GHz 共7个频点 的背部反射系数分布,其中任选的1个样本分布在4 个频点的分布如图3所示。可以看出,总体上人体背 部各点的反射系数随频率的增加而逐渐降低。从反 射系数的分布可以看出,人体背部组织基本呈对称 分布,这与人体的实际结构相符合。在固定频率点, 人体背部反射系数的分布随部位的不同而变化。在 骨组织明显的区域,如脊椎骨、肩胛骨、肋骨等所在 部位,反射系数较小。而在脂肪堆积的区域,如腰部 两侧的部分,反射较大。此外,随频率的增加,反射系 数较小区域的分布逐渐从肩部向腰部移动,可见生 物活体组织由于自身结构的复杂性,对频率的响应 也呈现复杂的变化。





Fig 3 The distribution of reflection coefficient on the human back at different frequencies

5 结 论

我们针对开口同轴探头与波导型测量探头的不 足,研究了能够透入生物组织内部的同轴贴片探头, 采用FDTD方法结合GA算法对其进行了优化设 计。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,且具有宽频带 响应的优点。采用该探头测量了1~7GHz范围内人 体背部不同位置的反射系数。测量结果表明:反射系 数不但随频率有较大的变化,而且随人体背部位置 的不同也有较大的变化,这为组织电特性的重建提 供了可靠的依据。

在进一步的研究工作中,根据宽频带内的反射 系数,通过反演计算得到各组织的电特性,从而给出 人体背部浅层组织(皮肤、脂肪和肌肉)的介电常数



- 1 Athey TW, Stuchly MA, Stuchly SS. Measurement of radiofrequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line: Part I. IEEE Trans MTT, 1982;30(1):82
- 2 Okoniewski M, Anderson J. Further analysis of open-ended dielectric sensors. IEEE Trans MTT, 1995; 43(8) : 1986
- ³ Wang YF, Hu BJ, Cui FR, et al. Optimum horn probe for detecting human body's subcutaneous tumor. Chinese Journal of Radio Science, 2000; 15(2): 208[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. 电波科学学报,2000; 15(2): 208]
- 4 Zhao X, Huang KM·A study of ill-conditioned problem in reconstruction of layered medium inside coaxial line·ACTA Electronica Sinica, 2003; 31(6):911[赵 翔,黄卡玛, 同轴线 中分层媒质电特性重建的病态性问题研究, 电子学报, 2003; 31 (6):911.]
- ⁵ 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, http://www.brooks.af.mil/AFRL/HED/hedr/reports/ dielectric/Title/Title.html

和电导密分布。24 China Academic Journal Electronic Publishing House. All 你确: 2004-09-28.

修回,2005-01-18) http://www.cnki.net