

贴片型生物医学测量探头的优化设计及其应用研究

闫丽萍 黄卡玛 刘长军

(四川大学电子信息学院 成都 610064)

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。目前对生物组织电特性成像技术已有电阻抗成像(EIT)和微波成像。但EIT成像分辨率低[1]、微波成像技术复杂且系统成本高[2],且两种成像技术目前在获得薄层组织如皮肤的电特性方面还存在困难,因此本文提出了基于生物分层均匀组织模型的浅表组织电特性无损测量方法:在局部小区域内,把浅表生物组织近似为分层均匀组织(皮肤、脂肪与肌肉层),通过体外测量多频点的反射特性来重建分层组织的电特性。这就需要设计合适的宽频带测量探头,使辐射近场集中于局部小范围内、且能够透入生物组织内部较深处。

针对同轴探头电磁场集中在内外导体之间,无法透入皮下组织深层的缺点[3],本文提出了一种透入深、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较深处。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。最后,利用该探头测量了人体背部在1GHz~7GHz范围内的反射特性。

1. 测量探头的结构

探头在组织中的辐射近场必须集中、透入深,且为无损测量探头。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,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 r_p ,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 r_{ap} ;外导体与贴片结构的接地板相连接。

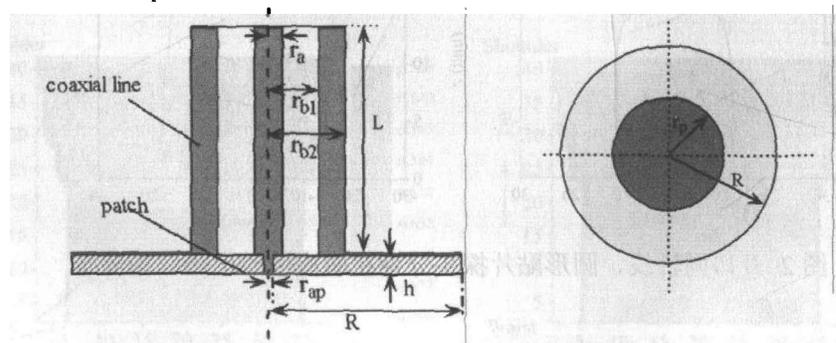


图1 同轴贴片探头结构示意图

2. 探头的优化设计

1. FDTD 数值模拟

本文采用 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[4]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \sum_{m=1}^4 \frac{\Delta\varepsilon_m}{1 + (j\omega\tau_m)^{(1-\alpha_m)}} + \frac{\sigma_j}{j\omega\varepsilon_0} \quad (1)$$

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， $\Delta\varepsilon$ 为静态介电常数与频率无限大时的介电常数的差值， τ 为弛豫时间， 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[4]。

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 $ds=0.5\text{mm}$ ，对应的时间步长为 $8.3 \times 10^{-13}\text{s}$ 。贴片基底半径 $R=1.5\text{cm}$ ，吸收边界采用二阶 Mur 吸收边界。

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：

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

式中， α_1 、 α_2 分别为常数，取值 10， Γ_i 为探头的反射系数， d_i 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 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： $r_a=1.5\text{mm}$ ， $r_{b1}=5.0\text{mm}$ ， $r_{b2}=8.0\text{mm}$ 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 $h=2.0\text{mm}$ ，贴片的半径为 2.5mm。

图 2 给出了贴片探头与开口同轴线分别在肌肉中的电场总场分布。图 3 给出了两种

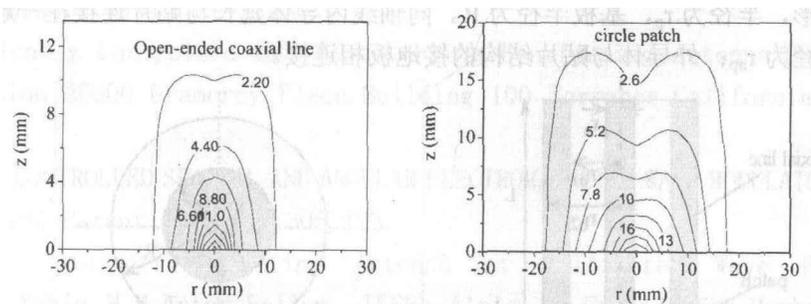


图 2 开口同轴线、圆形贴片探头分别在肌肉中的电场总场分布

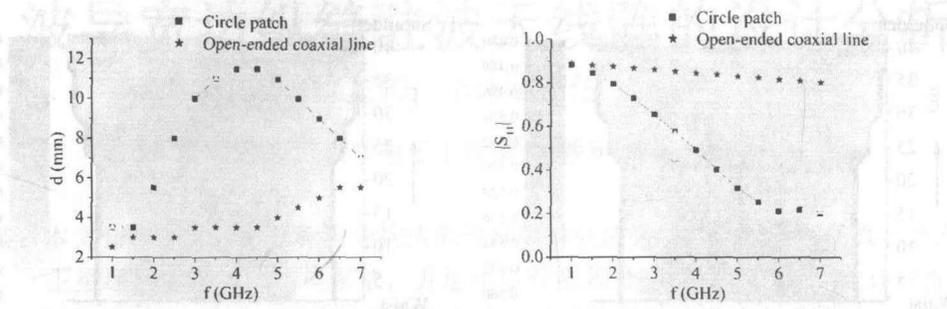
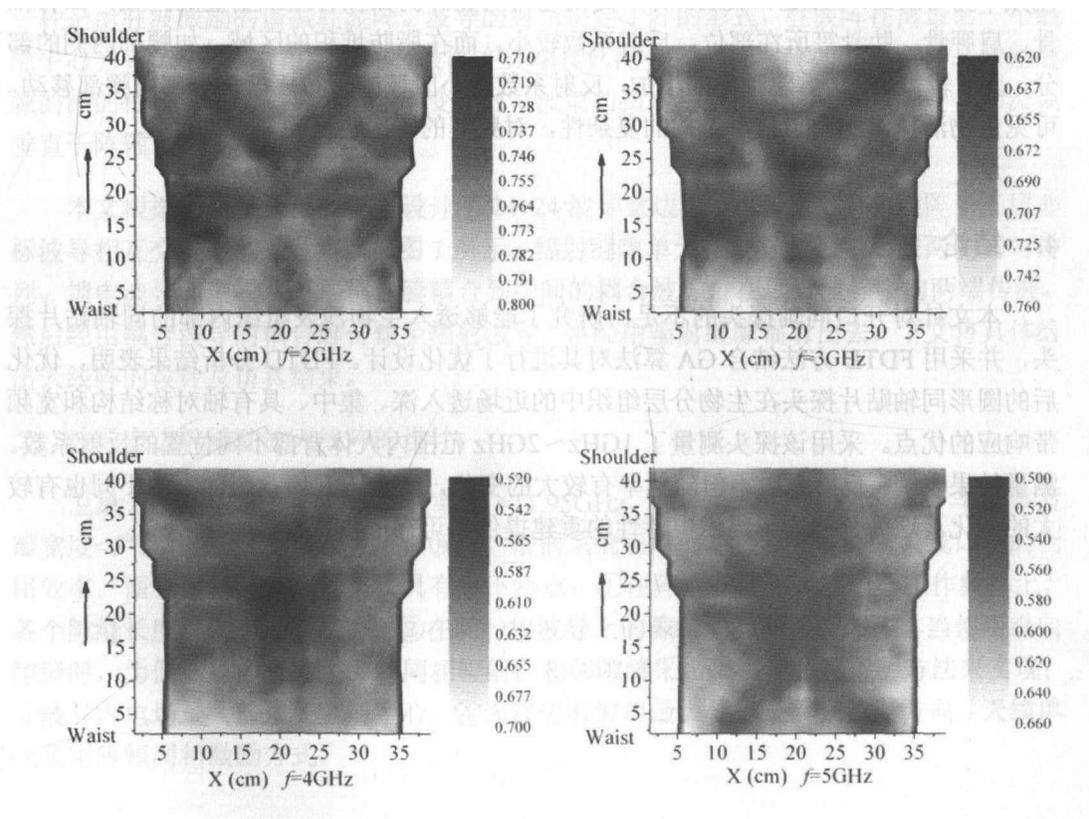


图3 两种探头在分层生物组织中反射系数与透入深度随频率的变化

探头在三层生物组织中的反射系数 $|S_{11}|$ 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。由图2、3可以看出，圆形贴片探头在肌肉组织中的近场透入深且分布相对集中，反射系数随频率的变化也最明显，这些对于电特性的重建是非常有利的。

3. 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E8363B 矢量网络分析仪，测量频率范围为1GHz~7GHz，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。



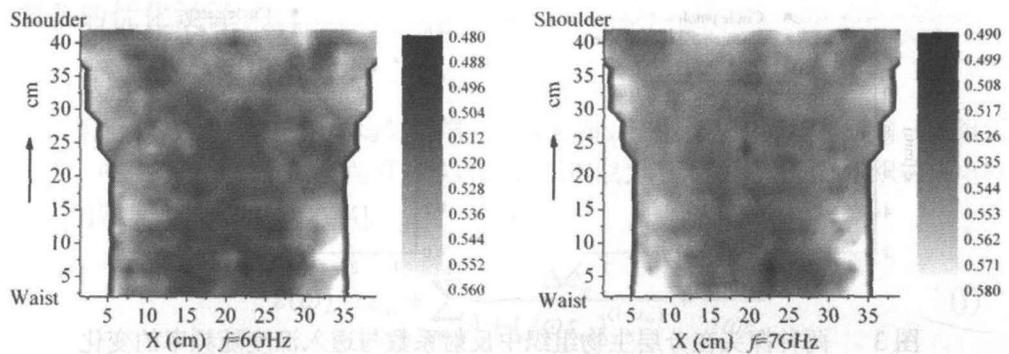


图 4 不同频点人体背部反射系数的分布

为了方便定标,测量时选择了 8 位身材相近的成年男性作为样本,每位样本背部测量相同的点数。横向每隔 1.5cm 确定一个点,纵向每隔 2cm 确定一个点。考虑到脊柱部位不平,无法保证探头与皮肤组织紧密接触,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 2GHz~7GHz 共 7 个频点的背部反射系数分布,其中任选的 1 个样本分布如图 4 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。尤其在频率为 2GHz、3GHz、4GHz 时,变化尤为明显。例如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。

4. 结论

本文针对开口同轴探头的不足,研究了能够透入生物浅表组织内部的同轴贴片探头,并采用 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、集中、具有轴对称结构和宽频带响应的优点。采用该探头测量了 1GHz~2GHz 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,这为分层均匀组织电特性的重建提供了可靠的依据。