

# 用 FDTD 法分析小腿的电磁散射特性\*

张国基\*\* 吴祥应 胡斌杰 赖声礼

(华南理工大学电子与通信工程系 广州 510641)

**【摘要】** 研究了利用微波检测白血病及监测白血病治疗过程的有关理论和技术。用 FDTD 法分析了当微波源采用 800 MHz 的无限长均匀线电流源和电偶极子天线时,人体小腿上部电磁散射特性与骨髓癌变程度的关系。数值结果表明,当采用电偶极子天线作为微波源时,可以获得较佳的分辨率及检测灵敏度。

**关键词** 电磁散射; 时域有限差分法; 白血病无损探测; 微波成像

**中图分类号** R318.03

由于白血病对人类特别是对青少年儿童的危害性很大,所以对其早期检测诊断和治疗十分重要。白血病常用的检查手段包括物理学检查、免疫学检查、细胞培养以及影像学检查、外周血象检查和骨髓相检查等,其中骨髓相检查是最常用的方法之一。骨髓穿刺活检时,对病人造成较大痛苦,操作不方便,也不容易实现对白血病治疗过程的实时监测。另外,由于白血病细胞和周围组织的密度大致相同,衰减系数相近,因而用 X 射线难于检测。在微波频段,白血病细胞的介电特性与周围组织却存在明显差异,会引起骨髓介电常数显著增加,电导率明显减少。文献[1~3]报道了利用电磁波检测白血病及成像的研究。该模型的机理是根据正常骨髓组织和癌变骨髓组织介电特性的差异,利用人体小腿上部电磁散射近场反演骨髓组织介电参数来探测白血病。在上述工作中,微波源是理想的无限长均匀线电流源,在实际应用中难以实现。因此,进一步研究新型的微波源就显得尤为重要。

## 1 基本理论

图 1 为白血病微波探测系统,图中小腿假设是膝下 6 cm 处富含骨髓的一段肌体,图 2 为膝下 6 cm 处横截面结构图。假设小腿上部各组织横截面结构及介电参数沿轴向不变;由于在微波频率下血液与肌肉的介电特性相近<sup>[4]</sup>,模型中忽略动脉和静脉,小腿周围是自由空间。

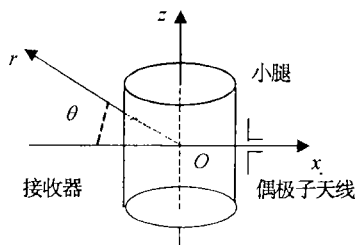


图 1 白血病微波探测系统

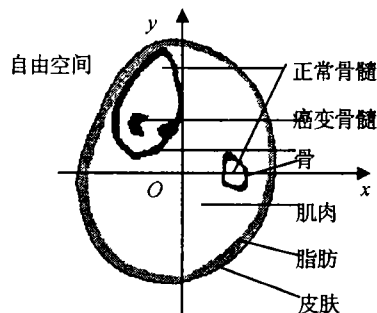


图 2 小腿结构图(膝下 6 cm 的截面)

由于 FDTD 法直接求解 Maxwell 的两个旋度方程,故可以完整地描述电磁波与小腿相互作用过程。在柱坐标系下,Maxwell 两个旋度方程可离散成下述 6 个差分格式

1999 年 10 月 3 日收稿

\* 国家自然科学基金资助项目,基金号:69671022;广东省自然科学基金资助项目,基金号:950169

\*\* 男 47 岁 博士生 副教授

$$H_r^{n+0.5}(i, j+0.5, k+0.5) = H_r^{n-0.5}(i, j+0.5, k+0.5) - \frac{\delta t}{u_0} \left[ \frac{E_z''(i, j+1, k+0.5) - E_z''(i, j, k+0.5)}{i\delta r\delta\theta} - \frac{E_\theta''(i, j+0.5, k+1) - E_\theta''(i, j+0.5, k)}{\delta z} \right] \quad (1)$$

$$H_\theta^{n+0.5}(i+0.5, j, k+0.5) = H_\theta^{n-0.5}(i+0.5, j, k+0.5) - \frac{\delta t}{u_0} \frac{E_r''(i+0.5, j, k+1) - E_r''(i+0.5, j, k)}{\delta z} - \frac{E_z''(i+1, j, k+0.5) - E_z''(i, j, k+0.5)}{\delta r} \quad (2)$$

$$H_z^{n+0.5}(i+0.5, j+0.5, k) = H_z^{n-0.5}(i+0.5, j+0.5, k) - \frac{\delta t}{u_0(i+0.5)\delta r} (i+1)E_\theta''(i+1, j+0.5, k) - \frac{(i)E_\theta''(i, j+0.5, k)E_r''(i+0.5, j+1, k) - E_r''(i+0.5, j, k)}{\delta\theta} \quad (3)$$

$$E_r^{n+1}(i+0.5, j, k) = \left[ 1 - \frac{\sigma(i+0.5, j)\delta t}{2\varepsilon(i+0.5, j)} \right] \left/ \left[ 1 + \frac{\sigma(i+0.5, j)\delta t}{2\varepsilon(i+0.5, j)} \right] \right. E_r^n(i+0.5, j, k) + \frac{\delta t}{\varepsilon(i+0.5, j)} \frac{1}{1 + \frac{\sigma(i+0.5, j)\delta t}{2\varepsilon(i+0.5, j)}} \left[ \frac{H_z^{n+0.5}(i+0.5, j+0.5, k) - H_z^{n+0.5}(i+0.5, j-0.5, k)}{(i+0.5)\delta r\delta\theta} - \frac{H_\theta^{n+0.5}(i+0.5, j, k+0.5) - H_\theta^{n+0.5}(i+0.5, j, k-0.5)}{\delta z} \right] \quad (4)$$

$$E_\theta^{n+1}(i, j+0.5, k) = \left[ 1 - \frac{\sigma(i, j+0.5)\delta t}{2\varepsilon(i, j+0.5)} \right] \left/ \left[ 1 + \frac{\sigma(i, j+0.5)\delta t}{2\varepsilon(i, j+0.5)} \right] \right. E_\theta^n(i, j+0.5, k) + \frac{\delta t}{\varepsilon(i, j+0.5)} \frac{1}{1 + \frac{\sigma(i, j+0.5)\delta t}{2\varepsilon(i, j+0.5)}} \left[ \frac{H_r^{n+0.5}(i, j+0.5, k+0.5) - H_z^{n+0.5}(i, j+0.5, k-0.5)}{\delta z} - \frac{H_z^{n+0.5}(i+0.5, j+0.5, k) - H_z^{n+0.5}(i-0.5, j+0.5, k)}{\delta r} \right] \quad (5)$$

$$E_z^{n+1}(i, j, k+0.5) = \left[ 1 - \frac{\sigma(i, j)\delta t}{2\varepsilon(i, j)} \right] \left/ \left[ 1 + \frac{\sigma(i, j)\delta t}{2\varepsilon(i, j)} \right] \right. E_z^n(i, j, k+0.5) + \frac{\delta t}{\varepsilon(i, j)} \frac{1}{1 + \frac{\sigma(i, j)\delta t}{2\varepsilon(i, j)}} \times \left\{ \frac{[(i+0.5)H_\theta^{n+0.5}(i+0.5, j, k+0.5) - (i-0.5)H_\theta^{n+0.5}(i-0.5, j, k+0.5)]}{i\delta r} - \frac{H_r^{n+0.5}(i, j+0.5, k+0.5) - H_r^{n+0.5}(i, j-0.5, k+0.5)}{i\delta r\delta\theta} \right\} J_z^{n+1}(i_0, j_0, k+0.5)\delta(i-i_0, j-j_0)[u(k-k_1) - u(k-k_2)] \quad (6)$$

式中  $\delta r$ 、 $\delta\theta$ 、 $\delta z$  为坐标  $r, \theta, z$  方向上的空间步长;  $\delta t$  为时间步长;  $\varepsilon$ 、 $\sigma$  为媒质的介电常数和电导率;  $u_0$  为自由空间磁导率;  $\delta(i-i_0, j-j_0)[u(k-k_1) - u(k-k_2)]$  表示电偶极子天线的空间位置,  $J_z(i_0, j_0, k+0.5)$  为天线电流分布。

柱坐标系轴线上的点为奇异点, 故需做特殊处理。小腿周边为无限大自由空间, 需要对自由空间加以截断, 并在截断边界网格点处设置吸收边界条件。对于径向边界采用二阶 Bayliss-Turkel 辐射边界条件,  $z$  向边界则采用一阶 Mur 吸收边界条件<sup>[5,6]</sup>。

## 2 数值结果及讨论

分析人体小腿上部微波散射特性时, 小腿各组织的介电特性如表 1 所示, 假定皮肤厚约 1mm。

表 1 小腿各组织在 800 MHz、37°C 下介电常数和电导率

组 织	介电常数	电导率 $s/m$
皮 肤	42.18	1.182
脂 肪	6.08	0.107
骨	6.08	0.107
肌 肉	55.20	1.424
正常骨髓	66.40	1.780
癌变骨髓	132.80	0.89

为比较正常骨髓与癌变骨髓组织电场幅度和相位的相对变化情况, 定义如下参量

$$\begin{cases} \eta_a = \frac{E_{xc} - E_{zn}}{E_{zn}} \\ \eta_p = \phi_c - \phi_n \end{cases} \quad (7)$$

式中  $E_{zn}$ 、 $\phi_n$  为无癌变时观察处的场强和相位;  $E_{xc}$ 、 $\phi_c$  为有癌变时观察处的场强和相位。

将电偶极子天线置于  $0^\circ$  方位角、距腿部约 1.5 cm 处, 小腿模型中的场强和相位随骨髓组织癌变后的分辨率如图 3 所示。从图 3 可以看出, 小腿上部周围空间的电磁散射特性在骨髓组织癌变后有很大的变化, 尤其是在小腿的前向散射位置上。

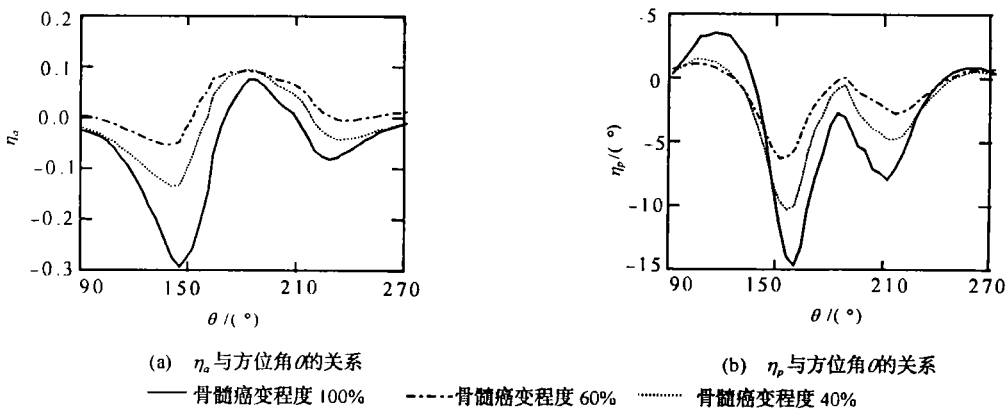


图 3 小腿外空间场强、相位随骨髓组织癌变的变化(电偶极子天线)

为便于比较, 本文还给出了无限长均匀线电流源情况下小腿的电磁散射特性。比较两种探测天线的计算结果可以看出, 采用电偶极子天线时, 骨髓前向方向的场强随癌变的变化程度要比采用理想线电流源时所对应位置的场强的变化程度大。

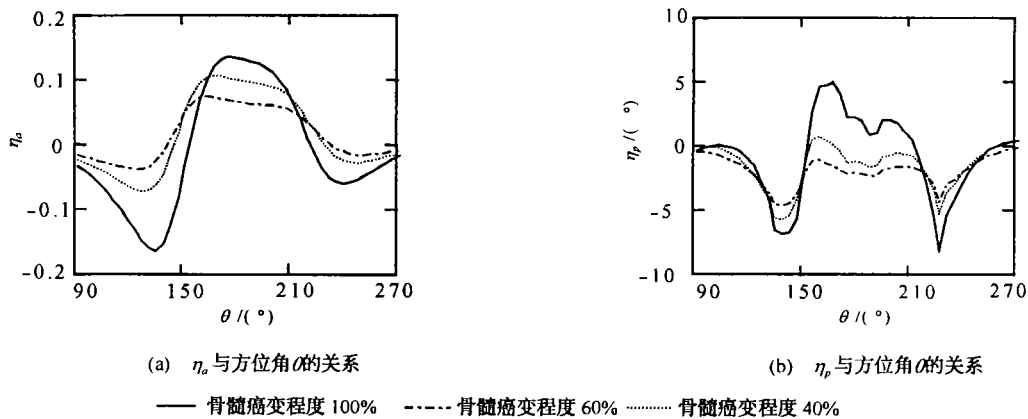


图 4 小腿外空间场强、相位随骨髓组织癌变的变化(线电流源)

### 3 结 论

本文对使用电偶极子天线和线电流源作为微波源的白血病探测系统进行了分析，采用柱坐标系下 FDTD 法分析了人体小腿上部微波散射特性及其与白血病不同病变程度的关系，计算了 800 MHz 工作频率下两种天线作为微波源时，人体小腿上部周围空间电场随白血病病变程度的关系。数值结果表明，当使用尺寸远小于波长的电偶极子天线时，可获得较好的探测灵敏度，该研究对白血病微波成像系统的研制具有重要参考价值。

### 参 考 文 献

- 1 Colton D, Monk P. A new approach to detecting Leukemia: using computational electromagnetics. IEEE Computational Science & Engineering, 1995, 2: 46~52
- 2 Colton D, Monk P. The detecting and monitoring of Leukemia using electromagnetic waves: mathematical theory. Inverse Problems, 1994, 10: 1 235~1 251
- 3 Colton D, Monk P. The detecting and monitoring of Leukemia using electromagnetic waves: numerical analysis. Inverse Problems, 1995, 11: 329~342
- 4 Foster K R, Schepps J L. Dielectric properties of tumor and normal tissues at radio through microwave frequencies. Microwave power, 1981, 16: 107~119
- 5 张国基, 吴祥应, 季 飞等. 微波在白血病无损探测中的应用: FDTD 分析模型. 华南理工大学学报, 1998, 26(12): 34~39
- 6 Mur M. The modeling of singularities in the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-Field equations. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1981, MTT-29(10): 1 073~1 077

## FDTD Analysis of Electromagnetic Scattering Characteristics from Lower Leg

Zhang Guoji    Wu Xiangying    Hu Binjie    Lai Shengli

(Dept. of Electronic Engineering, South China University of Technology Guangzhou 510641)

**Abstract** In this paper, the technique of detecting leukemia and monitoring its treatment by microwave is presented. Two types of microwave source with operating frequency 800 MHz, i.e., line

source and shorter antenna are considered. The finite-difference time-domain(FDTD) method is used to investigate the scattering field as the functions of the pathological degree of leukemia. The analysis shows that the better distinguishability and detective sensitivity can be obtained when shorter antenna is employed as microwave source.

**Key words** electromagnetic scattering; finite difference time-domain; nondestructive detecting of leukemia; microwave imaging

· 科研成果介绍 ·

## 机载远程战场侦察雷达 SAR 实时信号处理系统

主研人员: 黄顺吉 邱荣欣 吴井红 王建国 李凌杰 林水生 等

机载远程战场侦察雷达 SAR 实时信号处理系统是一种满足  $3\text{ m} \times 3\text{ m}$  分辨力、全数字、实时 SAR 成像处理系统的验证样机。该机开发应用世界上先进的超高速专用信号处理芯片 LH9124 和采用基 16FFT 算法, 设计了 FPGA 高速时序控制与寻址, 实现了高分辨实时成像处理。根据战术需要, 完成了 SAR 运动目标检测和成像, 以及机载斜视 SAR 带状区域成像的理论方法研究。

## 微带振子天线阵互耦及多次反射影响分析

主研人员: 邱文杰 方宙奇 袁映峰 张玉梅 万晓刚

天线的互耦分析是阵列天线设计中的关键技术。该项目完成了微带馈电偶极子天线单元间互耦及馈电平衡器与振子天线间多次反射的物理建模、计算公式的推导和计算机软件的编制。实践证明, 该软件可满足  $7 \times 7$  偶极子单元小面阵中天线的互耦计算和阵中天线的有源阻抗的计算等多项要求。计算与实测值吻合较好, 为工程设计提供了重要的理论依据和分析工具。

## 米波雷达超角分辨技术

主研人员: 黄振兴 何子述 张 扬 吕 明 黄鉴忠 郑昌璇 等

米波雷达超角分辨技术使用 Givens 变换递推算法、Burg 格形网络算法、SVD 等算法有效地实现了三种超分辨空间谱估值方法, 开发了相应的超分辨算法软件包, 在实验室中实现声传感阵数据采集系统。同时研制出一部板级三角形 10 节点 C-25Systolic 阵列超分辨信号处理机, 数据库为 50KFLOPS, 与声传感阵级联构成一个声波超分辨实验系统。