

# 人体对手机辐射吸收剂量的仿真研究

王曼珠<sup>1</sup>, 乔燕<sup>1</sup>, 路而红<sup>2</sup>

(1. 北京电子科技学院通信工程系 北京 丰台区 100070; 2. 北京电子科技学院电子信息工程系 北京 丰台区 100070)

**【摘要】**基于时域有限差分法在两种电磁辐射源作用下,对人体组织的局部比吸收量分布进行了数值分析计算,并利用三维数值电磁仿真软件对人体局部的比吸收率分布进行了仿真分析计算。结果表明,人体组织对电磁辐射吸收剂量的分布极不均匀,它与辐射频率、辐射强度、暴露时间以及人体组织的导电率、介电常数等多种参数有关。仿真研究表明减少手机表面电流、避开人体谐振频率可以减少人体的比吸收率。

**关键词** 电磁辐射; 时域有限差分法; 数值电磁仿真; 比吸收率  
**中图分类号** TN011 **文献标识码** A

## Research on Specific Absorption Rate of Electromagnetic Radiation in Human Body with Mobile Communication

WANG Man-zhu<sup>1</sup>, QIAO Yan<sup>1</sup>, and LU Er-hong<sup>2</sup>

(1. Department of Communication Engineering, Beijing Electronic Science and Technology Institute Fentai Beijing 100070;

2. Department of Electronic Information Engineering, Beijing Electronic Science and Technology Institute Fentai Beijing 100070)

**Abstract** Based on the method of finite difference time domain (FDTD), the analysis of the distribution of localized specific absorption in human tissues is made under the two electromagnetic radiation sources. In this paper, the imitative analysis and calculation on specific absorption rate (SAR) to the part of human body is achieved, especially head phantom, using 3D numerical electromagnetic computer software. Simulation results show that the distribution of absorption dosage of electromagnetic radiation to human body is of very asymmetry, which is effected by many parameters, such as radiant frequency, radiant intensity, exposure time, conductivity and permittivity of human tissues. Therefore, it will reduce the SAR to the human body by reducing electrical current on the surface of mobile telephone and avoiding resonance frequency of human body.

**Key words** electromagnetic radiation; finite-difference time domain; numerical electromagnetic simulation; specific absorption rate

随着移动通信的迅速发展,各种手持式收发信机(简称“手机”)的使用越来越普及,手机辐射对人体器官的影响也越来越引起人们的广泛关注。研究电磁辐射对人体的影响,需要解决两个基本问题:一是电磁辐射使生物体和组织发生了什么变化,即生物电磁效应;二是在多大的电磁剂量下会发生这种变化,即生物电磁剂量。二者的关系被称为量-效关系。生物体是一个复杂的电磁兼容系统,它可以与其他生物体以及电磁场源独立工作互不干扰,这种兼容能力是通过长期对自然界的适应进化而来的。一旦生物体电磁兼容状态由于外界电磁作用被破坏,便会出现各种功能的改变。由于绝大多数的生物组织都是非磁性物质(个别鸟类除外),即生物组织对外加磁场的响应与空气媒质相近,其磁导率可

用空气磁导率 $\mu_0$ 表示;生物组织在外加电场作用下表现出明显的导电特性和电介质特性,分别用 $\sigma$ 和 $\epsilon$ 表示。外界电磁场与生物体的相互作用非常复杂,是多种参数的复杂函数。由于电磁辐射能量一部分被人体反射,一部分被人体吸收,只有进入生物体内直接与生物系统发生相互作用的电磁场,才是产生生物效应的直接原因。因此,确定手机辐射在人体内形成的电磁吸收剂量非常重要。

## 1 电磁辐射吸收剂量

### 1.1 电磁辐射参量

手机对人体电磁辐射剂量学参数是用以表征外界电磁场入射生物体内并直接对生物体产生作用的物理量,主要有比吸收量(specific absorption, SA)

和比吸收率(specific absorption rate, SAR)。按取平均的组织区域不同,又分为全身平均SAR和局部平均SAR。在外电磁场的作用下,人体内将产生感应电磁场。由于人体各种器官均为有耗介质,因此,体内电磁场会产生电流,吸收和耗散电磁能量。

通常,商用手机的电磁辐射采用针对普通公众的“非受控”电磁环境下的辐射限值来约束;专业射频通信网设备的辐射则采用“受控”电磁环境下的辐射限值来约束。最基本的电磁辐射限值是在10 MHz~6 GHz范围内,非受控条件下全身平均的SAR值应小于0.08 W/kg。而受控环境下任意6 min全身平均SAR值为0.4 W/kg(IEEE 1982、IEEE 1992、CENELEC 1995、ICNIRP 1998)<sup>[1]</sup>,0.4 W/kg的限值是为了避免对人体温度调节系统产生影响而设置的。通过对灵长类动物实验表明,对温度调节系统引起可检测到影响的SAR剂量大约是1 W/kg(Adair 1994)<sup>[2]</sup>。因此手机使用者头部的局部SAR必须得到限制,以防止头部的局部升温。

## 1.2 吸收剂量

人体全身的比吸收率是频率的函数,首先由于人体组织的导电参数和介电常数是频率的函数;另一方面,比吸收率与生物体的大小、形状有关。人、猴子、老鼠暴露在同样的电磁场(1 mW/cm<sup>2</sup>)下,人的最大吸收发生在70 MHz左右(这个频率称为谐振频率),猴子的最大吸收发生在300 MHz左右,老鼠的最大吸收则发生在2 450 MHz附近。比吸收率随频率的空间分布也是非常不均匀的,对于5 GHz人体吸收能量主要分布在人体表面,在30~300 MHz时吸收主要分布于头部和躯干。

人体对手机辐射的吸收剂量因发射天线离人体很近需要作特殊考虑。外界电场及磁场的相位、方向、大小等相互关系非常复杂,它们由一点至另一点变化很快,因此,不便测定比吸收率的感应值。

研究人体对手机电磁辐射的吸收剂量,主要分析并计算人体局部(以头部为主)的吸收能量。如果进入人体的电磁辐射源,分别采用微分高斯信号EM1和EM2,采样周期 $\delta_t$ 为0.004 88 ns,空间离散间隔 $\delta_x=\delta_y=\delta_z=\delta=3$  mm,时间离散间隔 $\delta_t<\delta/2c$ ( $c$ 为真空中光速),满足计算稳定性条件。两个输入电磁辐射源的峰值 $E_{\text{peak}}$ 均归一化为1 V/m,其表达式为<sup>[3]</sup>:

$$E(t) = e_z E_0 \frac{t-t_0}{\tau} \exp\left[-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right] \quad (1)$$

EM1:  $t_0=2$  ns,  $\tau=1.5$  ns,  $E_0=8.26$  V/m; EM2:  $t_0=2$  ns,  $\tau=3.0$  ns,  $E_0=8.26$  V/m。

当人体受到电磁辐射时,体内所感生的电流可用感生电流密度 $J(i,j,k)$ 表示,它包含了位移电流密度和传导电流密度。比吸收量SA( $i,j,k$ )的计算式为:

$$SA(i,j,k) = \delta_t \sum_i \frac{E(i,j,k)}{\rho(i,j,k)} \frac{\partial D(i,j,k,t)}{\partial t} \quad (2)$$

式中  $\delta_t$ 为时间步长; $\rho(i,j,k)$ 为网格单元( $i,j,k$ )所对应的组织质量密度。人体局部各组织的比吸收能量分布如表1中所示。人体吸收的电磁辐射总能量为:

$$W_{\text{total}} = \delta_t \delta^3 \sum_i \sum_{i,j,k} E(i,j,k) \frac{\partial D(i,j,k)}{\partial t} \quad (3)$$

计算结果为:在电磁辐射源EM1作用下,人体总吸收能量 $W_{\text{total}}$ 为1.453 pJ;在电磁辐射源EM2作用下,人体总吸收能量 $W_{\text{total}}$ 为3.593 pJ。

表1 人体在两种电磁辐射源作用下体内部分组织SA( $r$ )局部最大值以及各组织平均SA

	SA( $r$ )/pJ·kg <sup>-1</sup>			
	EM1		EM2	
人体组织	最大值	组织平均值	最大值	组织平均值
体液	0.359	0.026	1.420	0.072
脂肪	0.255	0.004	1.491	0.011
淋巴	0.124	0.019	0.537	0.077
腺体	0.258	0.026	1.046	0.080
肌肉	0.728	0.019	2.809	0.051
血管	0.279	0.010	1.025	0.030
血液	0.294	0.009	1.102	0.033
软骨	0.294	0.020	0.742	0.045
韧带	0.411	0.025	1.574	0.063
皮肤	5.080	0.033	8.035	0.051
小脑	0.097	0.014	0.633	0.062
脑白质	0.065	0.019	0.101	0.031
脑灰质	0.122	0.025	0.292	0.044
脑脊液	0.278	0.041	1.333	0.119
神经	0.227	0.011	1.071	0.038
角膜	0.083	0.077	0.085	0.066
巩膜	0.103	0.034	0.182	0.041
晶体	0.050	0.041	0.046	0.033
玻璃体液	0.100	0.038	0.133	0.038
骨皮质	0.114	0.005	0.345	0.011
骨松质	0.163	0.008	0.526	0.018

## 1.3 数据分析

当人体处于手机电磁辐射环境中,局部SAR与人体内不同组织的电特性参数(随频率变化)、体内对应组织质量密度有关,与辐射电场的平方成正比,在近场区内与电流的平方成正比。因此,减少手机表面电流可以减少人体的比吸收率SAR。

从表1中可以分析出,在电磁辐射源EM1作用下,部分组织平均比吸收量为0.024 pJ/kg,局部比吸

收量最高值为5.080 7 pJ/kg, 为人体手部皮肤处。在电磁辐射源EM2作用下, 部分组织平均比吸收量为0.048 pJ/kg, 局部比吸收量最高值为8.034 7 pJ/kg, 仍为人体手部皮肤处。另外, 人体内的局部组织比吸收量的分布也极不均匀, 人体局部比吸收量SA(r)最大值分别达到局部平均比吸收量SA<sub>av</sub>值的212倍和167倍。

从人体对电磁辐射吸收的总能量分析, EM2电磁辐射源的作用时间是EM1辐射源的2倍, 作用于人体的总能量也是EM1的2倍。尽管EM1、EM2的电场强度峰值相同, 当两种电磁辐射分别作用时, 人体对EM2的吸收总能量是对EM1的吸收总能量的2.47倍。在电场辐射强度相同时, 人体对辐射能量的吸收与辐射作用时间成正比, 说明电磁辐射对生物体的危害表现出它对作用时间的累积效应。

## 2 模型仿真

目前, 仿真分析SAR还只是定义在实验室条件下, 针对电场强度或磁场强度、平均功率密度、感应电流或接触电流等不同的物理量。在仿真分析SAR时, 必须计入人体结构模型和辐射器件模型。

人体组织可以非常详细地被描述成15~30多种组织类型, 头部模型中包括骨骼、脑、肌肉、眼球、脂肪、皮肤和晶体等器官和组织。由于人体头部模型描述组织的电参数随频率变化, 在给定介电常数的情形下, SAR正比于头部组织的电导率。因此, 必须精确定义头部组织物质的介电常数以确保SAR计算的准确性。表2列出了目前国际通用的人体头部组织模拟液的电介质特性<sup>[2]</sup>。

表2 300 MHz~3 GHz头部等效组织材料的电介质特性

频率/MHz	相对介电常数ε <sub>r</sub> '	导电率σ
300	45.3	0.87
450	43.5	0.87
835	41.5	0.90
900	41.5	0.97
1 450	40.5	1.20
1 800~2 000	40.0	1.40
2 450	39.2	1.80
3 000	38.5	2.40

频率/MHz	相对介电常数ε <sub>r</sub> '	导电率σ
300	45.3	0.87
450	43.5	0.87
835	41.5	0.90
900	41.5	0.97
1 450	40.5	1.20
1 800~2 000	40.0	1.40
2 450	39.2	1.80
3 000	38.5	2.40

人体头部模型的外壳采用的是低损耗的电介质

材料, 头部模型的形状和尺寸参数以成年男子头部的统计数据为基础, 外耳部分主要以耳朵的解剖数据为基础。在数值电磁仿真计算中, 所用的数值计算模型是基于核磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)的信息或解剖切面方法建立的, 对头部可达到1~3 mm的分辨率, 然后将模型数据信息输入到CAD文件里。图1给出了不同频率的头部模型内的SAR分布。

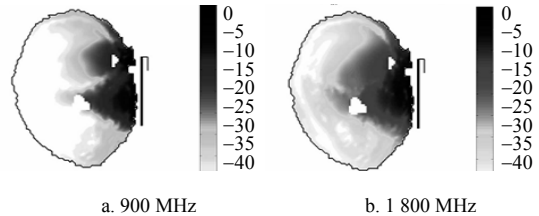


图1 900 MHz和1 800 MHz头部模型SAR分布

基于FDTD的全波三维电磁仿真软件XFDTD可以仿真并计算出在手机电磁辐射情况下, 人体局部(头部)的SAR, 如图2所示。

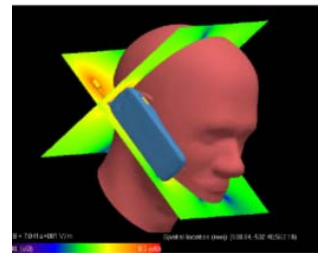


图2 局部 SAR 的仿真视图

首先将人体头部模型的内部和外部CAD文件分别导入XFDTD。外部文件是包括耳朵在内的人体头部模型外部绝缘壳的文件, 内部文件是头部模型内部与大脑组织电参数近似的导电介质的文件。

为了表明XFDTD具有计算手机附近的头部SAR的能力, 还需要将手机模型导入到XFDTD, 然后把手机设置在耳朵附近的适当位置, 并使手机模型接触到头部模型。

网格化手机模型和头部模型。XFDTD中网格化速度相当快, 需要设置并锁定所要的网格大小; 再设置自由空间的边界条件就会生成手机及头部网格模型。用网格显示和编辑工具来检查网格模型的正确性并定义端口。在手机盒和天线接口定义馈点, 并在此馈点定义激励波形, 最后设定需要分析给出的数据处理结果。

激励源为具有50 Ω源阻抗、900 MHz正弦电压源时, 仿真结果得出局部平均SAR为0.061 42 W/kg, 该值低于限制值0.08 W/kg(非受控条件下全身平均SAR值应小于0.08 W/kg)。SAR的最大值为5.358 7 W/kg以及最大值位置为135, 181, 175。垂直平面的1 g平

均SAR的最大值为3.301 5 W/kg以及最大值位置为148, 178, 162。垂直平面的10 g平均SAR的最大值为2.461 0 W/kg以及最大值位置为148, 178, 162。垂直平面的电场视图如图3所示。

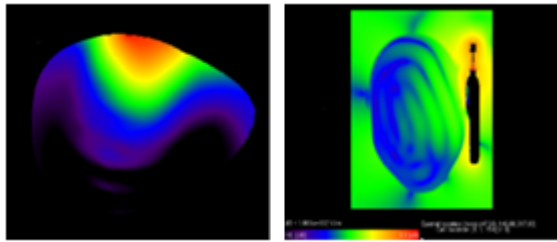


图3 垂直平面的电场视图

从电磁辐射剂量学的研究角度来看,在当前缺乏统一的人体组织标准的测试模型、测试条件、测试布置、计算工具的情况下,判断人体对手机电磁辐射的SAR是否符合限值,常常不具有可比性(只在特定频率如900 MHz,特定人体组织参数,给出特定人体局部模型——头部的平均SAR)。借助计算机仿真分析,对制定统一的测试模型、测试方法,可以提供相应的参考数据,对定量分析及深入研究生物电磁剂量具有一定的参考价值。

### 3 结 论

本文以不同的角度分析计算了人体(局部)对电磁辐射吸收剂量的表征参数。基于FDTD法,计算了在两种电场源的电磁辐射作用下,人体内局部比吸收量(SA)的分布以及吸收的总能量;利用电磁仿真软件分析计算出人体局部模型(头部)的平均SAR以及1 g平均SAR和10 g平均SAR等数据。这两种方法在其他参量的电磁辐射(辐射强度、作用时间等)作用下,对人体其他部位的结构模型进行分析研究,都具有普遍意义。

### 参 考 文 献

[1] IEEE C95, 1-1991(also IIEEC95. 1-1992). IEEE standard for

safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields. 3 kHz ~ 300 GHz[S]. USA, 1992.

- [2] 王洪博, 王 南, 齐殿元. 手机电磁辐射评估[J]. 安全与电磁兼容, 2004, 1: 55-59.
- [3] 王海彬, 牛中奇. 人体对电磁脉冲吸收剂量的研究[J]. 电波科学学报, 2006, 21(2): 259-264.
- [4] REYHANI S M S, LUDWIG S A. An implanted spherical head model exposed to electromagnetic fields at a mobile communication frequency[J]. IEEE Trans on Bio Engineering, 2006, 53(10): 2092-2101.
- [5] BERNARDI P, CAVAGNARO M, PISA S. Specific absorption rate and temperature elevation in a subject exposed in the far-field of radio-frequency sources operating in the 10~900 MHz range[J]. IEEE Trans on Bio Engineering, 2003, 50(3): 295-303.
- [6] YIOULTSIS T V, KOSMIDOU T I. A comparative study of the biological effects of various mobile phone and wireless LAN antennas[J]. IEEE Trans on Bio Engineering, 2002, 38(2): 777-780.
- [7] BERNARDI P, CAVAGNARO M, PISA S, et al. Power absorption and temperature elevations induced in the human head by a dual-band monopole-helix antenna phone[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(12): 2539-2546.
- [8] NIKITA K S, CAVAGNARO M. A study of uncertainties in modeling antenna performance and power absorption in the head of a cellular phone user[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(12): 2676-2685.
- [9] BERNARDI P, CAVAGNARO M, PISA S. Evaluation of the SAR distribution in the human head for cellular phones used in a partially closed environment[J]. IEEE Trans on EMC, 1996, 38(30): 357-366.
- [10] 窦维苹, 张林昌. 暴露于手机下45°人体模型内外场和能量分布的研究[J]. 微波学报, 2000, 16(3): 265-271.
- [11] 康 刚, 祝西里, 王长清, 等. 单极天线对人体作用的剂量学分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1996, 32(5): 635-641.
- [12] 牛中奇. 电磁波生物学效应研究中的电磁剂量学概述[C]//中国科协2005年学术年会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2006: 84-86.

编辑 漆 蓉