

# 基站天线远场全身暴露人体内 SAR 计算

刘宝华<sup>①</sup>, 杨旭富<sup>①</sup>, 孔令丰<sup>①</sup>, 李永明<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>广东省环境辐射监测中心, 广东 广州 510300;

<sup>②</sup>重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**【摘要】**采用人体CT数据, 重构形成三维模型, 并赋予组织器官电磁参数, 构成适合电磁计算的人体模型。应用XFDTD软件计算在频率900 MHz、1 800 MHz和2 100 MHz, 功率密度200  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、40  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、8  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 和4  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的移动通信基站远场全身暴露下, 人体模型内比吸收率分布。并与《电磁辐射防护规定 (GB8702-1988)》基本限值进行比较, 为设计有效的电磁场生物效应实验方案、控制暴露条件提供理论剂量学依据。

**【关键词】**全身暴露; 远场; 比吸收率; 基本限值

**【中图分类号】**TP391

**【文献标识码】**A

**【文章编号】**1002-0802 (2010) 08-0228-03

## SAR Calculation in Wholly-exposed Human Body in the Far-field of Mobile Communication Base-stations

LIU Bao-hua<sup>①</sup>, YANG Xu-fu<sup>①</sup>, KONG Ling-feng<sup>①</sup>, LI Yong-ming<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>Guangdong Environmental Radiation Monitoring Center, Guangzhou Guangdong 510300, china; <sup>②</sup>State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**【Abstract】**By using CT data of human body to reconstruct three-dimensional model, and endowing this model with the electromagnetic parameters of tissues and organs, the human body model suitable for electromagnetic computation is thus formed. The whole body is exposed in the far field of mobile communication base-stations at the frequency of 900MHz, 1800MHz and 2100MHz and the power density of 200  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , 40  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , 8  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  and 4  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ . The XFDTD software is applied to calculating the specific absorption rate in the human-body model. By comparison of specific absorption rate with the basic limit of "regulations for electromagnetic radiation protection (GB8702-1988)", a theoretical dosimetry is provided for designing effective experimental scheme of electromagnetic-field biological effects and controlling the exposure conditions.

**【Key word】**whole-body exposure; far field; SAR(specific absorption rate); basic limit

### 0 引言

电磁场与生物体的相互作用是从物理到生物的一个复杂过程。计算人体全身暴露于移动通信基站天线远场体内比吸收率(SAR)的分布, 可掌握环境中移动通信基站电磁场暴露对人体作用的实际剂量水平, 为设计有效的电磁场生物效应实验方案、采取更为合理的暴露条件提供依据; 同现行电

磁场暴露标准限值进行比较, 为制定新的、更为合理的电磁场暴露限值提供理论剂量学参考<sup>[1]</sup>。

### 1 SAR

目前生物电磁学中通常采用SAR即“生物体单位时间、单位质量所吸收的电磁辐射能量, 单位W/kg”作为表征机体对电磁能量吸收的剂量学量。

当场值达到稳定后, 人体内分布  $SAR(r)$  计算式为:

$$SAR(r) = \frac{\sigma(r)}{2\rho(r)} |\vec{E}(r)|^2, \quad (1)$$

其中,  $\sigma(r)$  为生物体组织内  $r$  点处的等效电导率(单位为每米西门子, S/m),  $\rho(r)$  为生物组织内  $r$  点处质量密度(单位

**收稿日期:** 2010-04-13。

**基金项目:** 广东省环境保护厅专项资金资助(编号: 粤环[2006]100号)。

**作者简介:** 刘宝华(1978-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为环境电磁兼容和辐射防护; 杨旭富(1953-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为环境辐射监督管理; 孔令丰(1965-), 男, 博士, 教授级高工, 主要研究方向为环境辐射监管和防护; 李永明(1964-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电磁场数值计算。

为每立方千克  $\text{kg/m}^3$ ),  $\vec{E}(r)$  为生物组织内  $r$  点处的电场强度 (单位为每米伏特  $\text{V/m}$ )。

局部平均比吸收率  $SAR_a$  和全身平均比吸收率  $WBA-SAR$  可由分布比吸收率  $SAR(r)$  外推得到即:

$$SAR_{av}(r) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\int \sigma(r) |\vec{E}(r)|^2 dv}{\int \rho(r) dv} \quad (2)$$

当计算对象为生物组织、器官或某一区域时, 计算结果即为对应组织、器官或区域的  $SAR_a$ ; 当计算对象为整个生

物体时, 计算结果即为  $WBA-SAR$  [2-3]。

## 2 人体暴露模型构建

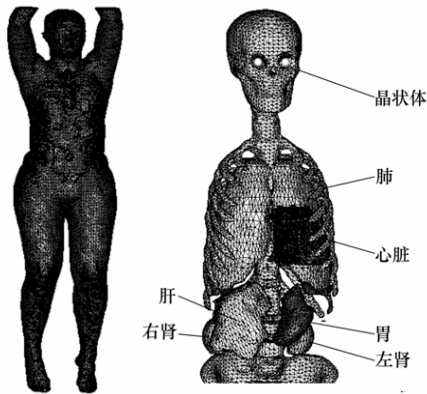
### 2.1 人体结构模型

为了保证计算结果可信和可靠, 现采用同类文献中的一些构建原则来建模[4-6]。将模型主要分为10种不同组织与器官: 脂肪、肌肉、心脏、肝脏、肾、胃、肺, 眼睛晶状体、大脑和全身骨骼。人体模型电磁参数来源于REMCOM公司, 详见表1。

表 1 人体模型各主要组织与器官电磁参数

器官		900 MHz		1 800 MHz		2 100 MHz	
$\rho$ /(kg/m <sup>3</sup> )		$\epsilon_r$	$\sigma$ /(S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ /(S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ /(S/m)
骨架	1850	12.61	0.172	11.93	0.302	11.78	0.366
肌肉	1059	60.73	1.198	57.03	1.840	56.36	2.140
脂肪	943	4.786	0.053	4.507	0.067	4.483	0.077
大脑	1035.5	52.80	1.009	47.79	1.525	47.22	1.842
肺部	563	50.96	0.880	49.07	1.343	48.55	1.591
胃部	1126	71.78	1.301	68.75	2.044	68.28	2.340
肾脏	1147	53.90	1.349	53.38	1.785	52.74	2.046
肝脏	1050	46.80	0.850	44.20	1.290	43.00	1.690
眼睛	1163	51.48	0.908	49.47	1.342	48.90	1.573
心脏	1059	60.73	1.198	50.73	1.180	56.36	2.140

图1为总成的可用于电磁场仿真计算的人体结构模型和人体内主要器脏的分布模型, 其中肺, 心脏, 肝, 肾, 胃都是由CT数据重构而来, 而眼睛由等效球体代替晶状体。



(a) 用于电磁计算的人体结构模型 (b) 人体内主要器脏的分布模型

图1 用于电磁计算的人体结构模型和人体内主要器脏的分布模型

## 3 SAR 计算

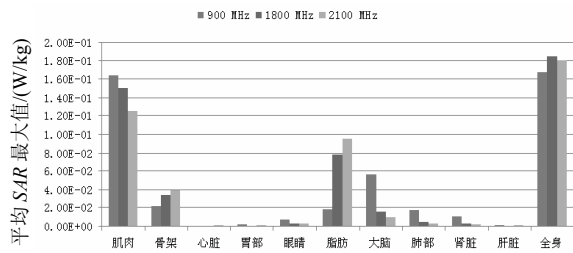
采用国内移动通信主要频段 900 MHz、1 800 MHz 和 2 100 MHz 作为激励源的频率, 采用《电磁辐射防护规定 (GB8702-1988)》中对应频段的职业照射导出限值、公众照射导出限值、项目管理目标值和根据广东省 21 个地级市主城区电磁辐射水平区域调查结果统计出的公众暴露水平作为激励源的输出功率即  $200 \mu\text{W/cm}^2$ 、 $40 \mu\text{W/cm}^2$ 、 $8 \mu\text{W/cm}^2$

和  $4 \mu\text{W/cm}^2$ , 以连续正弦波为电磁能量载体, 应用由美国 REMCOM 公司开发的 XFDTD 软件计算全身暴露人体模型内  $SAR$  值。计算结果汇总如下。

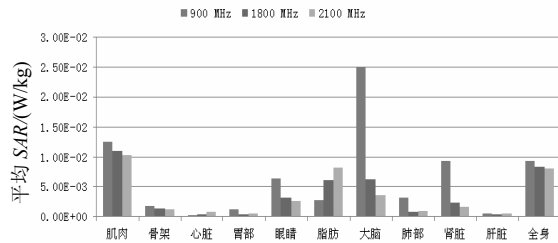
### (1) 平均 $SAR$

由图 2 可见, 大脑、眼睛、肺部、肾脏、肝脏等组织器官对 900 MHz 电磁波能量的吸收大于对 1 800 MHz 和 2 100 MHz 电磁波能量的吸收; 而脂肪则对 1 800 MHz 和 2 100 MHz 电磁波能量的吸收大于对 900 MHz 电磁波能量的吸收; 在体内主要器官中, 大脑的平均  $SAR$  值大于其它器官; 900 MHz 电磁波下的全身平均  $SAR$  大于 1 800 MHz 和 2 100 MHz 电磁波下的全身平均  $SAR$ 。可以得出, 人体对电磁波能量的吸收与电磁波的频率有关, 随着频率的上升, 人体对电磁波能量的吸收由体内逐渐转向体表; 人体对 900 MHz 电磁波能量的吸收要大于对 1 800 MHz 和 2 100 MHz 电磁波能量的吸收。

由图 3 可见, 在同等条件下, 体内  $SAR$  与暴露水平成正比; 全身及主要组织器官每 10 g 组织平均  $SAR$  最大值要大于整体平均  $SAR$  值; 在  $200 \mu\text{W/cm}^2$  和  $40 \mu\text{W/cm}^2$  暴露水平下, 全身平均  $SAR$  值与《电磁辐射防护规定 (GB8702-1988)》中职业暴露、公众暴露基本限值相比尚有一定裕量; 暴露水平为  $4 \mu\text{W/cm}^2$ , 人体全身平均  $SAR$  远低于《电磁辐射防护规定 (GB8702-1988)》公众暴露基本限值。

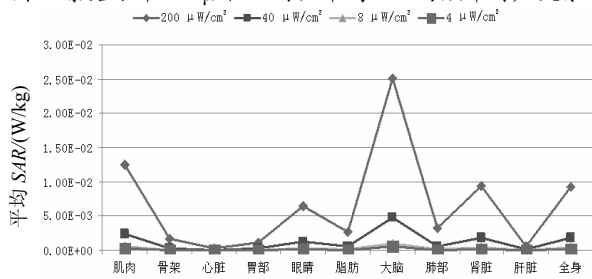


(a) 10g 组织平均 SAR 最大值

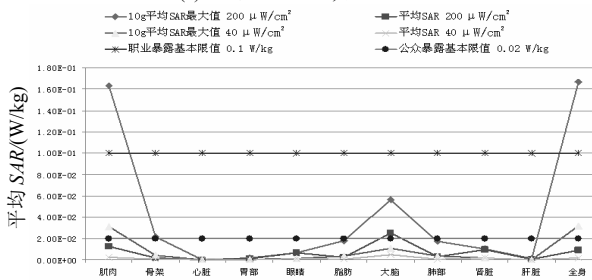


(b) 平均 SAR

图 2 暴露水平  $200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  时, 平均 SAR 与频率对应关系



(a) 频率 900 MHz, 平均 SAR

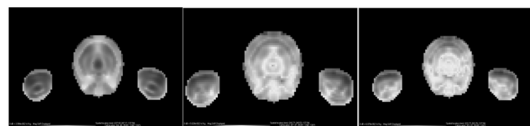


(b) 频率 900 MHz, 平均 SAR 与标准暴露限值对比

图 3 不同暴露水平, 全身及主要组织器官平均 SAR

## (2) 分布 SAR

图 4 和图 5 是暴露水平相同而频率不同时, 大脑、眼睛、心、肺一个截面的  $SAR(r)$ 。可见, 在暴露水平相同时, 大脑、眼睛、心、肺在 900 MHz 频率下的  $SAR(r)$  值要大于 1800 Hz 和 2100 MHz 频率下的  $SAR(r)$  值。



(a) 频率 900 MHz (b) 频率 1800 MHz (c) 频率 2100 MHz

图 4 暴露水平  $200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  时大脑、眼睛的  $SAR(r)$



(a) 频率 900 MHz (b) 频率 1800 MHz (c) 频率 2100 MHz

图 5 暴露水平  $200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  时心、肺的  $SAR(r)$

## 4 结语

由计算结果可得, 暴露水平为《电磁辐射防护规定 (GB8702-1988)》职业暴露和公众暴露导出限值时, 人体全身平均 SAR 要低于职业暴露和公众暴露的基本限值, 且尚有一定裕量。因此在实际环境电磁辐射暴露中, 当暴露水平超过导出限值时, 基本限值不一定被超出, 所以在环境保护领域, 以导出限值作为环境电磁辐射水平是否超标的判定依据, 从保护公众、保护环境和偏保守的角度而言是合适的。

以环境中实际电磁辐射水平作为电磁场生物效应实验的暴露条件, 研究生物体、离体细胞、在体细胞等在低暴露水平下的生物效应, 可为移动通信基站这种长期、低强度电磁场暴露对人体健康和环境是否存在潜在危害提供有效科学证据。

## 参考文献

- [1] 苏镇涛, 杨国山. 电磁辐射剂量学研究进展[J]. 中国辐射卫生, 2003, 12(03):189-191.
- [2] 牛中奇, 侯建强, 周永军, 等. 生物电磁剂量学及人体吸收电磁剂量的数值分析[J]. 中国生物医学工程学报, 2006, 25(05):580-584.
- [3] 陈波. 手机电磁辐射的研究及其对人体的影响[J]. 通信技术, 2009, 42(03):106-110.
- [4] DIMBYLOW P J. FDTD Calculations of the Whole-body Averaged SAR in an Anatomically Realistic Voxel Model of the Human Body from 1 MHz to 1 GHz[J]. Physics in Medicine and Biology, 1997(42): 479-490.
- [5] WANG J Q. FDTD Calculation of Whole-body Average SAR in Adult and Child Models for Frequencies from 30 MHz to 3 GHz[J]. Physics in Medicine and Biology, 2006, (51):4119-4127.
- [6] MART'INEZ-B' M, MART'IN A, ANGUIANO M, et al. On the Safety Assessment of Human Exposure in the Proximity of Cellular Communications Base-station Antennas at 900, 1800 and 2170 MHz[J]. Physics in Medicine and Biology, 2005(50): 4125-4137.

欢迎广大作者踊跃投稿!

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训：

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>