

SAR测量中系统验证的测量与分析

李晋¹, 安晴², 李彬³

¹河北科技大学国家无线电监测中心检测中心, 北京

²中国传媒大学信息与通信工程学院, 北京

³北京交通大学国家无线电监测中心检测中心, 北京

收稿日期: 2023年5月17日; 录用日期: 2023年6月17日; 发布日期: 2023年6月27日

摘要

随着手机等含有射频发射天线的物品在人们生活中逐渐普及, 在设计过程中就必须考虑到电磁能量吸收比值(SAR)。该指标的大小能够衡量射频发射器不会对人体产生危害, 保证电磁安全, 因此是在制作发射器时非常重要的因素。为了保证SAR测量的准确性, 在测量系统软件被更改升级, 或硬件设备需要调整时, 需要及时进行SAR系统验证。本文通过六个步骤进行SAR系统验证, 测量结果均符合测试规定中的指标, 能够验证完整测量系统的精度符合要求。

关键词

电磁能量吸收比值(SAR), 电磁安全, 系统验证

Measurement and Analysis of System Verification in SAR Measurement

Jin Li¹, Qing An², Bin Li³

¹The State Radio Monitoring Center Testing Center, Hebei University of Science & Technology, Beijing

²School of Information and Communication Engineering, Communication University of China, Beijing

³The State Radio Monitoring Center Testing Center, Beijing Jiaotong University, Beijing

Received: May 17th, 2023; accepted: Jun. 17th, 2023; published: Jun. 27th, 2023

Abstract

With the increasing popularity of items containing radio frequency transmitting antennas such as mobile phones, the specific absorption rate (SAR) must be considered in the design process. The size of this indicator can measure that the RF transmitter will not cause harm to human body and

ensure electromagnetic safety, so it is a very important factor when making the transmitter. In order to ensure the accuracy of SAR measurement, when the measurement system software is changed or upgraded, or the hardware equipment needs to be adjusted, SAR system verification needs to be carried out in a timely manner. In this paper, SAR system verification is carried out in six steps, and the measurement results are in line with the indicators specified in the test, which can verify that the accuracy of the complete measurement system meets the requirements.

Keywords

Specific Absorption Ratio (SAR), Electromagnetic Safety, System Validation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着信息技术和制造业的发展,无线通信设备逐渐融入了大众日常生活,但如果这些无线通信设备的电磁辐射过大,会对人体的健康造成一定的影响,因此需要规定衡量其影响强弱的标准。SAR 意为电磁波吸收比值或比吸收率。是手机或无线产品的电磁波能量吸收比值,其定义为每单位质量人体组织所吸收的功率,单位为 W/kg。SAR 的测量是通过无线发射机产生电场,在一个充满组织等效液的模型中测量,通过不同的组织等效液体来模拟人体结构,最终计算在给定质量上的最大 SAR 平均值。通过测量 SAR 能够得知在外电磁场的作用下,人体内产生的感应电磁场,从而进行各种无线通信终端对于人体电磁辐射安全的评估。目前电磁监管机构已对射频发射机提出了最大 SAR 的限制规定,以确保人们在使用含有这些无线发射机的通信设备时不会对人体产生危害。

目前手机已在人们的日常生活中普及,因此手机天线设计过程中 SAR 的测量与不同用户与场景之间 SAR 的比较与分析成为了目前研究的热点。在[1] [2]研究中分别讨论了手机辐射对于人头部的影响以及在儿童和成人使用手机时 SAR 数值的比较,在[3]研究中讨论了手机中使用低尺寸 High-Q 天线时 SAR 数值的影响因素。为了降低手机的 SAR 值,减小对人体可能产生的影响,在[4]中设计出了一款低 SAR 值的手机天线,为低 SAR 手机天线的设计提供了理论指导。而且由于长期演进(LTE)的部署,该设计为即时 LTE 手机应用演示了符合主流设计的天线原型。在 LTE 部署后,多输入多输出(MIMO)天线系统将很快安装在手机上,因此研究[5] [6] [7]针对 MIMO 天线 SAR 的测量进行了研究分析,找到了针对 MIMO 天线更快捷简便的测量方式,并对不同 MIMO 天线 SAR 测量结果进行了分析总结,为后续的

Table 1. Reference table for equivalent liquid dielectric constants of various test frequencies

表 1. 各测试频率参考的组织等效液体介电常数参考表

Freq.(MHz)	Liquid parameters	Measured	Target	Delta (%)	Tolerance (%)	Verdit
450	ϵ_r	43.871	43.5	0.85	±10	Pass
	σ [S/m]	0.887	0.87	1.91	±10	Pass
750	ϵ_r	40.760	41.9	-2.72	±10	Pass
	σ [S/m]	0.902	0.89	1.35	±10	Pass

Continued

835	ϵ_r	42.904	41.5	3.38	± 10	Pass
	σ [S/m]	0.884	0.9	-1.79	± 10	Pass
900	ϵ_r	40.969	41.5	-1.28	± 10	Pass
	σ [S/m]	0.987	0.97	1.77	± 10	Pass
1450	ϵ_r	41.938	40.5	3.55	± 10	Pass
	σ [S/m]	1.204	1.2	0.36	± 10	Pass
1800	ϵ_r	41.942	40	4.85	± 10	Pass
	σ [S/m]	1.349	1.4	-3.62	± 10	Pass
2000	ϵ_r	38.545	40	-3.64	± 10	Pass
	σ [S/m]	1.338	1.4	-4.45	± 10	Pass
2450	ϵ_r	37.644	39.2	-3.97	± 10	Pass
	σ [S/m]	1.741	1.8	-3.30	± 10	Pass
5200	ϵ_r	36.12	36	0.33	± 5	Pass
	σ [S/m]	4.59	4.66	-1.57	± 5	Pass
5300	ϵ_r	35.52	35.9	-1.05	± 5	Pass
	σ [S/m]	4.94	4.76	3.81	± 5	Pass
5600	ϵ_r	36.95	35.5	4.09	± 5	Pass
	σ [S/m]	5.22	5.07	3.01	± 5	Pass
5800	ϵ_r	36.34	35.3	2.94	± 5	Pass
	σ [S/m]	5.32	5.27	0.99	± 5	Pass

SAR 测量提供了一定理论支持。

为了获得这些在不同情况下无线发射机的 SAR，来与目前已有的规定值进行对比，需要尽量提高测量的精度以进行更加准确的分析。在实际测量步骤中，影响测量的因素包含很多，目前已有研究针对组织等效液体复杂介电常数测量进行了熟练性测试[8]。在联邦通信委员会工程和技术实验室给出的测量要求 SAR measurement 100 MHz to 6 GHz 中也给出了针对探头距离设置、分区域扫描等多种情况的处理方案。

上述测量要求中提出：SAR 系统在部署前必须根据其性能规格进行验证，来验证完整测量系统的精度，以及用于单个或一组 SAR 测量的软件和控制算法的精度。因此本文针对 SAR 系统验证进行了分析与测试，按照以下六步完成在实际测量前系统的校准调试，能够保证完整测量系统的精度符合后续其他实际测试的要求：

- 1) 进行了完整的 1 g 和 10 g 平均 SAR 测量。
- 2) 使用与手机 SAR 评估相同的测试网格点间距测量局部 SAR 值。
- 3) 重复第一步中的操作，验证不同输入功率下的 SAR 值。
- 4) 验证周期性脉冲调制信号的探头线性度。
- 5) 验证在低输入功率水平下，SPEAG 探针符合规定要求的范围。

6) 验证探头轴向各向同性。

2. SAR 系统验证的准备与设备要求

为了能够实现准确的系统验证,在进行引文所述的六步 SAR 测量前,需要进行测试环境的准备以及设备到测量位置距离等信息的计算。根据测试规定中给出的要求,测试实验室需要满足以下介电性能以及厚度公差要求:介电常数在小于等于 3 GHz 时需满足 $2 \leq \epsilon_r \leq 5$,在大于 3 GHz 时需满足 $3 \leq \epsilon_r \leq 4$,损耗角正切 ≤ 0.05 ;扁平模型底部的厚度应为 2 mm,误差范围应在 ± 0.2 mm 以内。模型壳材料应抵抗用于制造组织等效液体的化合物,以避免损坏,并保持 ± 0.2 mm 的公差。

当填充液体时,体模在源正上方的下垂,在测量小于等于 3 GHz 的 SAR 时,等效液体的深度为 ≥ 15.0 cm,误差范围应在 ± 0.5 mm 内。这些深度应确保 SAR 探针在沿着不同的探针角度扫描其曲面时充分浸没在组织介质中,在变焦扫描体的顶部和上面的液体-空气边界之间有可接受的分离。

对于不同的 SAR 探针校准点频率,需要不同的偶极子。参考偶极子位于模型底部下方,对于 1 GHz 到 6 GHz 之间的测量,空间距离 s 应为 10 mm,误差范围在 ± 0.2 mm 以内,其轴线平行于最长侧,使用低损耗和低相对介电常数垫片来确定参考偶极子的中心轴与液体之间的正确距离。偶极子通常被调谐到与探头相同的校准频率和校准,通过在偶极子端部使用金属调谐元件对参考偶极子进行调谐。参考偶极子经过优化,在测试频率下具有优于 -20 dB 的回波损耗。

Table 2. Calibrate SAR values

表 2. 校准 SAR 值

Freq. (MHz)	SAR measured (normalized to 1 W)		Target (Ref. Value)	Delta (%)	Tolerance (%)
450	1 g	4.64	4.92	-5.69	± 10
	10 g	3.24	3.28	-1.22	± 10
750	1 g	8.56	8.49	0.82	± 10
	10 g	5.88	5.55	5.95	± 10
835	1 g	9.28	9.56	-2.93	± 10
	10 g	6.08	6.22	-2.25	± 10
900	1 g	10.44	10.9	-4.22	± 10
	10 g	6.76	6.99	-3.29	± 10
1450	1 g	27.36	29.0	-5.66	± 10
	10 g	16.40	16.0	2.50	± 10
1800	1 g	40.00	38.4	4.17	± 10
	10 g	20.88	20.1	3.88	± 10
2000	1 g	42.56	41.1	3.55	± 10
	10 g	19.96	21.1	-5.40	± 10
2450	1 g	50.76	52.4	-3.13	± 10
	10 g	25.44	24.0	6.00	± 10
2600	1 g	56.08	55.3	1.41	± 10
	10 g	26.12	24.6	6.18	± 10

Continued

3500	1 g	65.70	67.1	-2.09	±10
	10 g	24.40	25.0	-2.40	±10
3700	1 g	65.50	67.4	-2.82	±10
	10 g	24.30	24.2	0.41	±10
5200	1 g	73.40	76.5	-4.05	±10
	10 g	21.50	21.6	-0.46	±10
5500	1 g	82.70	83.3	-0.72	±10
	10 g	22.80	23.4	-2.56	±10
5800	1 g	79.60	78.0	2.05	±10
	10 g	21.40	21.9	-2.28	±10

在系统评估之前,使用 DAK 将组织等效液体的介电参数控制在距离目标 5% 以内,各测试频率参考的组织等效液体介电常数参考表 1,测量过程将电介质评估套件与网络分析仪结合使用。实验室的环境由空调调节,系统通过进行测量,定期验证环境射频噪声水平,实际测试环境图如图 1 所示。



Figure 1. SAR test environment diagram
图 1. SAR 测试环境图

3. 数据测量与分析

3.1. 平均 SAR 测量

在此步骤中,进行了完整的 1 g 或 10 g 平均 SAR 测量。参考偶极子输入功率设置为 250 mW (对于 3 GHz 以上的频率为 200 mW)。对于偶极源,将结果归一化为 1 W 正向输入功率:在区域扫描($9 \times 14 \times 1$)情况下,SAR (测量)最大值为 2.79 W/kg。在缩放扫描($7 \times 7 \times 7$)情况下,峰值 SAR (外推值)为 4.02 W/kg,SAR (1 g)为 2.61 W/kg,SAR (10 g)为 1.69 W/kg,SAR (测量)最大值为 2.81 W/kg。测量结果如图 2 所示,与表 2 (第 3 列或第 4 列)所示的校准 SAR 值进行比较,测量值和数值目标值之间的差异不超过 10%。

3.2. 局部 SAR 测量

该步骤中,使用与手机 SAR 评估相同的测试网格点间距,沿参考偶极子馈电点正上方的垂直轴测量局部 SAR 值,结果如图 3 蓝色曲线所示,然后沿另一条垂直轴重复该测量,与参考偶极子馈电点的横向偏移分别正负 20 mm,结果如图 3 绿色和黄色曲线所示。将 SAR 值外推到模型表面,并与表 2 第 6 列中馈电点正上方的 SAR 绝对值为 16.3 W/kg,与目标值相差-0.70%;沿 y 轴偏移馈电点 20 mm 后的 SAR 绝对值为 5.84 W/kg,与目标值相差 8.00%,均符合测试规定的要求。

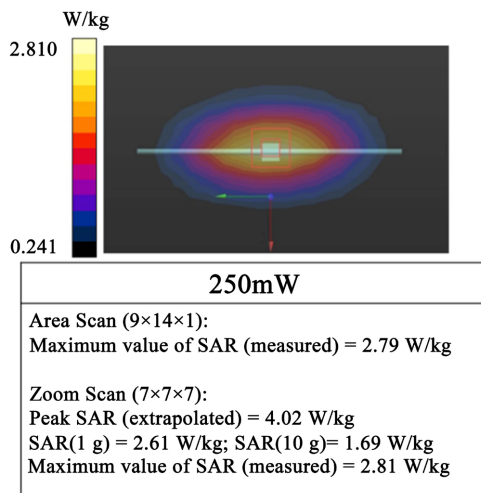


Figure 2. SAR field strength distribution map and average SAR measurement results at 250 mW input power

图 2. SAR 场强分布图及 250 mW 输入功率下平均 SAR 测量结果

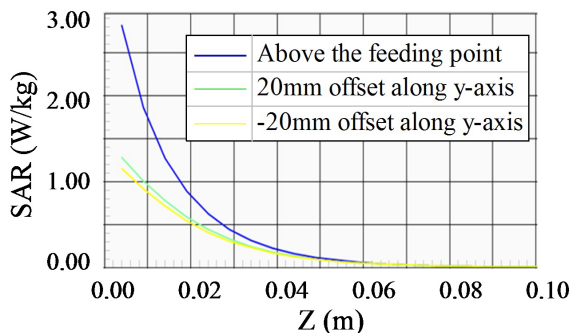


Figure 3. Local SAR measurement results

图 3. 局部 SAR 测量结果

3.3. 不同输入功率下的 SAR 值测量

本步骤使用不同的输入功率水平重复步骤 A 中的测量,记录了四种不同输入功率水平的 SAR,包括: 250 mW、160 mW、31 mW、0.7 mW。其中输入功率为 250 mW 的结果已在步骤 A 中已测量, 160 mW、31 mW、0.7 mW 的结过图分别如图 4 所示。将测量的 SAR 值归一化为偶极子源的 1 W 正向输入功率,并与步骤 3.1 中的 1 W 归一化值进行比较。测量数据结果如图 4 所示,线性的最大偏差应小于 10%。本文按照输入功率由大到小排列,将测得的 SAR 归一化为: 10.44、10.69、10.71、10.77 W/kg,其中与目标值相差最大为 3.17%,符合测试规定的要求。

3.4. 周期性脉冲调制信号的探头线性度验证

步骤 2.4 应在满足步骤 2.3 要求后进行。用占空因数为 0.1、脉冲重复率为 10 Hz 的周期性脉冲调制信号重复步骤 3.1 中的测量。调整功率以产生具有周期脉冲调制信号的约 8 W/kg 的 1 g 峰值空间平均 SAR (对应于约 80 W/kg 峰值 SAR)。将测量的 SAR 值归一化为 1 W 与步骤 2.1 中的 1 W 归一化值进行比较。测量数据结果如图 5 所示,这些值之间的差值应小于 10% 的系统验证扩展不确定度。

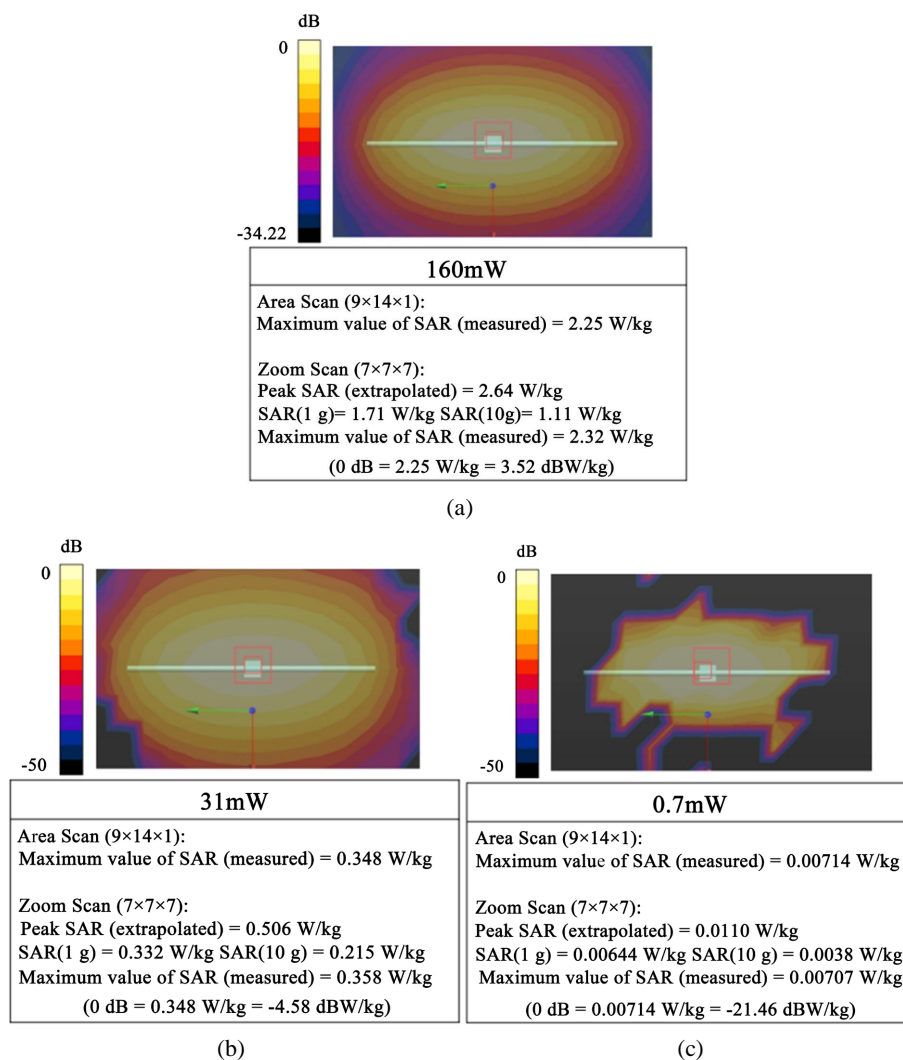


Figure 4. SAR field intensity distribution map and SAR measurement results under different input power (a) 160 mW; (b) 31 mW; (c) 0.7 mW

图 4. SAR 场强分布图及不同输入功率下 SAR 测量结果(a) 160 mW; (b) 31 mW; (c) 0.7 mW

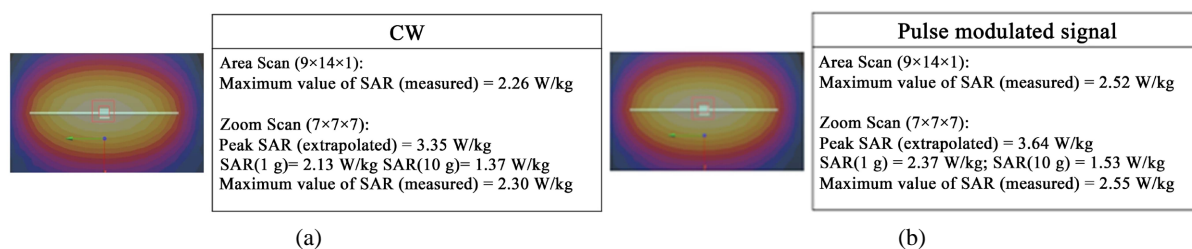


Figure 5. SAR field intensity distribution and measurement data of CW input signal (a) and periodic pulse modulation signal (b)

图 5. CW 输入信号(a) 与周期性脉冲调制信号; (b) 的 SAR 场强分布图及测量数据

3.5. 低输入功率水平下 SPEAG 探针规范性的验证

该步骤与步骤 2.3 相结合,即使用 5 mW 的最低输入功率水平,产生的 1 g 或 10 g 平均 SAR 约为 0.05 w/kg。表中所示的结果证实,在低输入功率水平(4.6 mW)下,归一化的 1 W SAR 值与步骤 2.1 中比较,

差异未超过 10% 的系统验证扩展不确定度, SPEAG 探针在其规格范围内, 符合测试规定的要求(图 6)。

3.6. 探头轴向各向同性验证

探头传感器的几何中心放置在位于验证源中心上方, 距离模型内表面的测量距离约为 1 个探头尖端直径。探头绕其轴旋转 $\pm 180^\circ$, 步数不大于 15° 。记录最大和最小 SAR 读数。使用 5% 的程序, 这些值之间的差异应小于或等于轴向各向同性分量的扩展不确定度, 以较小者为准。测量结果如图 7 所示, 数值上下浮动为 ± 0.03 dB, 在扩展不确定度 ± 0.2 dB 之内, 符合所要求。

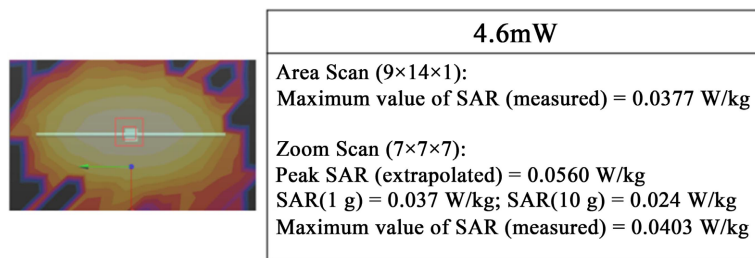


Figure 6. SAR field intensity distribution and SAR measurement results of low power (4.6 mW) input signal

图 6. 低功率(4.6 mW)输入信号的 SAR 场强分布图及 SAR 测量结果

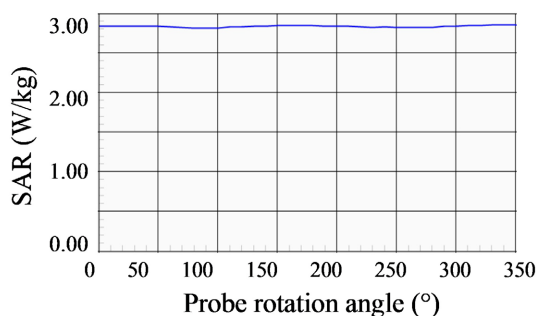


Figure 7. Axial isotropic measurement data of the probe

图 7. 探头轴向各向同性测量数据

4. 总结

本文针对测试规定中的 SAR 系统验证部分分为六步进行了测量和分析, 包含了平均 SAR 测量、局部 SAR 测量, 验证了不同输入功率下的 SAR 符合规定要求; 验证周期性脉冲调制信号的探头线性度; 验证在低输入功率水平下, 探针符合规定要求的范围; 最后验证了探头轴向各向同性。通过以上步骤能够完成在实际测量前的系统验证, 一切测试结果均符合所需的数据要求。当 SAR 探头、系统组件或软件被更改、升级或重新校准时, 这些组件必须通过以上步骤进行验证。SAR 系统验证能够确保实际射频发射机被准确测量, 为提高未来研究中 MIMO 低 SAR 手机天线等辐射设备的测量精度奠定了基础, 具有重要的研究意义。

参考文献

- [1] Lu, M. and Ueno, S. (2012) Comparison of Specific Absorption Rate Induced in Brain Tissues of a Child and an Adult Using Mobile Phone. *Journal of Applied Physics*, **111**, 07B3111-07B3113. <https://doi.org/10.1063/1.3672854>
- [2] Iqbal-Faruque, M.R., Aisyah-Husni, N., Ikbal-Hossain, M. *et al.* (2014) Effects of Mobile Phone Radiation onto Hu-

-
- man Head with Variation of Holding Cheek and Tilt Positions. *Journal of Applied Research & Technology*, **12**, 871-876. [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)70593-0](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)70593-0)
- [3] Bahramzy, P., Svendsen, S., Jagielski O. and Pedersen, G.F. (2015) SAR Study of Mobile Phones as a Function of Antenna Q. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, **63**, 4139-4147. [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)70593-0](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)70593-0)
- [4] Zhang, H.H., Yu, G.G., Liu, Y., Fang, Y.X., Shi, G. and Wang, S. (2021) Design of Low-SAR Mobile Phone Antenna: Theory and Applications. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, **69**, 698-707. <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3016420>
- [5] Le, D.T., Hamada, L., Watanabe, S. and Onishi, T. (2017) A Fast Estimation Technique for Evaluating the Specific Absorption Rate of Multiple-Antenna Transmitting Device. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, **65**, 1947-1957. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2670328>
- [6] Li, H. Tsiaras, A. and Lau, B.K. (2017) Analysis and Estimation of MIMO-SAR for Multi-Antenna Mobile Handsets. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, **65**, 1522-1527. <https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2647708>
- [7] Zhao, K., Zhang, S., Ying, Z., Bolin, T. and He, S. (2013) SAR Study of Different MIMO Antenna Designs for LTE Application in Smart Mobile Handsets. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, **61**, 3270-3279. <https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2250239>
- [8] Wu, T., Zhou, X., *et al.* (2020) Proficiency Testing for Complex Permittivity Measurements of Tissue Equivalent Liquid Used in SAR Assessment. *IEEE Access*, **8**, 210592-210596. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3039279>