

终端天线性能一致性检测系统研究

侯建强, 牛中奇

(西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 将微扰谐振理论进行推广, 得到了天线的特性参数与将其放入谐振腔后谐振腔的谐振频率二者之间是线性相关的结论. 并用实验方法对该理论进行了验证, 选取天线的谐振频率作为特性参数进行实际测量, 然后将测量结果与将天线放入谐振腔后所测的谐振腔的谐振频率进行相关性分析, 结果表明二者是线性相关的, 其相关系数大于 0.93. 根据这一推广的微扰谐振理论, 建立了一套天线性能一致性检测系统, 该系统可以对大批量天线进行快速地逐个测量, 单次测量时间小于 10s. 该系统可对小型天线性能的一致性进行检测, 还可对其他小体积样品的特性进行测量.

关键词: 微扰理论; 谐振腔; 天线测量; 性能一致性

中图分类号: TN828.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2009)04-0675-05

Research on the measurement system for terminal antenna quality conformability

HOU Jian-qiang, NIU Zhong-qi

(School of Electronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: The resonance perturbation theory is extended in this paper, and the result could be deduced that the antenna performance in the free space and the resonance frequency of the cavity and antenna system (the antenna is placed in the cavity) are correlative. A new experimentation is designed to verify the correlation between the antenna resonance frequency of antenna and the cavity-antenna system. Experimental results show the correlation coefficient is above 0.93, which proves that the deduced theory is correct. Based on such a theory, a measurement system for terminal antenna quality conformability is developed. The terminal antenna which is produced by the industrialization process could be measured quickly and accurately with this system, and the duration of measurement is less than 10s. So the measurement efficiency could be improved greatly. Besides the small antenna conformability, this system could be used to measure the specification of other small samples such as cable connector.

Key Words: perturbation theory; resonance cavity; antenna measurement; quality conformability

天线是手持设备(例如手机)的重要部件,虽然在进入工业化生产之前,已对该天线的实验室样品进行过全面的辐射特性测试,但却并不能保证以该样品为模本而通过工业化生产手段生产出的批量产品中的每只天线都是合格的,因而在将其装配于手机之前仍需进行逐一地检测,但是这种检测并不像对待实验室样品那样去全面地测量它的各种特性参数,而是通过测量与天线的特性参数相关的其他量来反映天线的性能,即所谓天线的性能一致性检测.这种检验方法是出于这样的一种考虑:天线是经过前期研发而确认性能是合乎要求的,而且采用的工业化生产工艺和流程是经过论证和检验的,因而生产出的数以万计的天线的特性参数是服从高斯分布的,且特性参数分布在高斯曲线峰值附近的天线样本总是大多数,而特性参数远离高斯曲线峰值的样本总是少数.通常,依据实际情况设定特性参数允许的误差范围,即在高斯曲线峰值两侧划定一个范围,其特性参数落在该范围内的天线样本被视为合格产品,超出该范围的天线样本被视为不合格产品.虽然从天线样本总体上讲

收稿日期:2008-06-16

基金项目:国家自然科学基金资助(30870577)

作者简介:侯建强(1977-),男,西安电子科技大学博士研究生,E-mail:jqhou@mail.xidian.edu.cn.

不合格产品总是少数,但对于一个具体的天线样本而言,在未经检测之前却无法预知它是否为合格产品,因而也不允许不经检验便将其装配于手机,所以对手机天线的逐一检测便成为一个不可缺少的生产工序.如前所说,对工业化生产的天线性能的检测不同于对实验室天线样品的测量,主要区别在于:(1)由于研发中的天线样品的特性是不可预期的,因而要对它的诸多辐射参数进行全面测量,才能评价是否达到预期要求,而工业化生产的天线产品是通过一定的工艺流程对研发出的已定型天线样品进行“克隆”的产物,因而只需通过测量与天线的特性参数相关的其他量值来反映天线的性能即可,并且评价一个具体天线样品是否合格的标准是看其是否服从大多数天线在该量值上具有的共性;(2)由于研发中的天线样品处在实验室研究阶段,因而允许在一个样品测量中花费很长时间,而天线产品处在手机装配阶段,因而只允许快速而便捷地给出是否合格的结论;(3)对研发中的天线样品有着较为一致的测量方法,而对天线产品是否合格的检验却是依据各手机生产厂家的特长来自行开发检测系统,采取个性化的天线性能一致性检测方法.

对于研发中的天线样品的测量多采用空中特性(OTA)、总辐射功率(TRP)和总全向灵敏度(TIS)方法. OTA^[1-2]方法可全面考察天线的辐射特性,TRP和TIS方法可以模拟手机靠近人体头颅时天线的辐射特性.但这些方法并不适于数以万计的手机天线产品的质量检测.因此笔者将谐振微扰理论加以推广,并以此为理论基础,设计并建立了一套对天线产品性能一致性进行检测的系统.

1 谐振微扰理论简要回顾

如所周知,若将横截面尺寸为 $a \times b$, 长度为 L 的一段矩形波导的两端短路,便构成一个矩形谐振腔.这时,沿谐振腔的 3 个边长方向只能存在驻波,且腔体面上的任意一点均为驻波的波节点,即电磁场 $\mathbf{E} = \mathbf{H} = \mathbf{0}$ 的点.但这并不意味着腔内只能存在一种电磁波模式.实际上,沿 3 个边长方向的半波长的整数倍(以 m, n 和 p 表示)分别等于 a, b 和 L 的那些个电磁波模式均可存在.如果在两端短路之前的波导中传输的是 TE(TM)模,则称谐振腔内电磁波为 TE_{mnp} (TM_{mnp})模^[3].但在实际应用中往往通过电磁波频率的选择,使腔内只存在单一模式.当腔内为自由空间(空气填充时可近似看作自由空间),则谐振腔的谐振频率为

$$\omega_0 = \frac{\pi}{(\mu_0 \epsilon_0)^{1/2}} \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 + \left(\frac{p}{L} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (1)$$

如果将一体积为 ΔV ,介电常数和磁导率分别为 ϵ 和 μ 的介质放入谐振腔内,则介质会对腔内原有的电磁场产生扰动,在 ΔV 远小于腔体体积 V 的条件下,扰动是微小的,其结果只会改变谐振腔的谐振频率而不会改变腔内电磁场的结构模式.理论证明,放入介质之前和之后谐振腔的谐振频率 ω_0 和 ω 的关系为^[4]

$$(\omega_0 - \omega)/\omega_0 = -\Delta W/(W + \Delta W), \quad (2)$$

式中
$$W = \int_V \frac{1}{4} [\epsilon_0 \mathbf{E}_0^* \cdot \mathbf{E} + \mu_0 \mathbf{H}_0^* \cdot \mathbf{H}] dV, \quad (3)$$

$$\Delta W = \int_{\Delta V} \frac{1}{4} [(\epsilon - \epsilon_0) \mathbf{E}_0^* \cdot \mathbf{E} + (\mu - \mu_0) \mathbf{H}_0^* \cdot \mathbf{H}] dV, \quad (4)$$

其中 $\mathbf{E}_0, \mathbf{H}_0$ 和 \mathbf{E}, \mathbf{H} 分别为放入介质之前和之后腔内电场和磁场的复矢量振幅,星号表示取共轭.由于 $\Delta V \ll V$,故 $\Delta W \ll W$,因而式(2)可改写为

$$(\omega - \omega_0)/\omega_0 \approx -\Delta W/W. \quad (5)$$

又考虑到放入介质后,在整个腔体 V 内只有 ΔV 这一很小局部中的 \mathbf{E}_0 变为 \mathbf{E}, \mathbf{H}_0 变为 \mathbf{H} ,而其余部分的电磁场虽与 \mathbf{E}_0 和 \mathbf{H}_0 不同但差别却很小,加之 $\Delta V \ll V$,故式(4)可改写为

$$W \approx \int_V \frac{1}{4} [\epsilon_0 \mathbf{E}_0^* \cdot \mathbf{E}_0 + \mu_0 \mathbf{H}_0^* \cdot \mathbf{H}_0] dV = W_0. \quad (6)$$

式(6)表明,放入介质后腔内的 W 与放入介质前腔内的电磁能 W_0 近似相等且精度足够高,因而式(5)可进一步改写为

$$(\omega - \omega_0)/\omega_0 \approx -\Delta W/W_0. \quad (7)$$

由此可知,放入介质后,谐振腔谐振频率的偏移 $\omega - \omega_0$ 仅与介质占据空间 ΔV 内的 ΔW 有关,而从式(4)可看出, ΔW 又与介质的电磁参数 ϵ 和 μ 以及体积 ΔV 和形状有关(与形状有关的原因是,形状不同则对应的电磁

边界条件不同,因而即使 ϵ, μ 和 ΔW 相同,其内 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 的分布也不同,从而导致 ΔW 不同).反之,对于一个确定的介质而言,由于电磁参数 ϵ 和 μ 及其结构参数 ΔW 和形状是确定的,因而 ΔW 也是确定.

2 推广的谐振微扰理论

笔者的目的在于利于谐振微扰理论对手机天线的性能一致性进行检测,值得注意的是,导出式(7)的前提是放入谐振腔内的物体是 $\sigma=0$ 的理想介质,而这里放入谐振腔内的手机天线却是 $\sigma \neq 0$ 的有耗媒质.那么,在此条件下式(7)能否应用便是一个值得讨论的问题.以下分析表明,对于有耗媒质而言,式(7)仍然是可以应用的.这是因为,只要把针对理想介质的介电常数 ϵ 换为针对有耗媒质的复介电常数 $\tilde{\epsilon} = \epsilon - j\sigma/\omega$,按照推导式(7)的思路和过程则可得

$$(\tilde{\omega} - \omega_0)/\omega_0 \approx -\Delta W/W_0, \quad (8)$$

式中 $\tilde{\omega}$ 为谐振腔的谐振频率^[4].若以 ω 表示 $\tilde{\omega}$ 的实部,则 ω 所满足的关系式依然为式(7).也就是说,当放入谐振腔内的物体为有耗媒质时,用 $\tilde{\omega}$ 的实部 ω 来反映有耗媒质的特性仍然是可行的.由此可知,以式(7)作为手机天线性能一致性检测的理论基础依然是正确的.

在确认式(7)可作为手机天线性能一致性检测的理论基础之后,随之而来的另一个问题是:如果通过式(7)中的 ω 来反映天线的特性,那么所反映出的特性参数只能是天线内部交互电磁能的增量 ΔW ,然而,工程上描述天线特性的参数却是辐射频率(在此以 ω' 表示),辐射电阻 P_r ,增益 G ,方向性系数 D 等而不是 ΔW ,因此只有将式(7)中 ΔW 换为天线自身的特性参数,比如换为便于测量的辐射频率 ω' ,才能将(7)式作为手机天线性能一致性检测的合乎常理的理论基础.分析表明,可用 ω' 替换式(7)中的 ΔW ,理由是:从谐振腔角度看问题可知,当天线的大小、形状以及构成材料的 ϵ, σ, μ 确定之后,则式(4)右端的 \mathbf{E}, \mathbf{H} 以及 ϵ, μ 将随之确定(大小和形状确定之后则对应的电磁边界条件便被确定,因而其内的 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 随之确定),从而 ΔW 被确定.因此 ΔW 只能是放在谐振腔内的天线的大小、形状以及构成材料的 ϵ, σ, μ 的函数.另一方面,从天线的角度看问题可知,当天线的大小、形状以及构成材料的 ϵ, σ, μ 确定之后,天线的辐射特性也随之被确定.即天线的特性参数只能是天线的大小、形状以及构成材料的 ϵ, σ, μ 的函数.由于 ΔW 和天线的特性参数都是同一组变量的函数,则它们之间一定是相关的.既然 ΔW 与天线的特性参数是相关的,自然与天线自身的辐射频率 ω' 也是相关的.值得说明的是,在此之所以特别强调 ΔW 与天线自身辐射频率 ω' 间存在着相关性,仅仅是因为 ω' 相比与辐射电阻 P_r ,增益 G 和方向性系数 D 等而言是较易测量的参数,因而便于对相关性进行实验验证,但这并不排斥 ΔW 与辐射电阻 P_r ,增益 G 和方向性系数 D 也是相关的结论. ΔW 与 ω' 间的相关关系为

$$-\Delta W/W_0 = f(\omega') \quad (9)$$

将式(7)代入式(9)则有

$$(\omega - \omega_0)/\omega_0 = f(\omega') \quad (10)$$

虽然不可能也无必要推导出 $f(\omega')$ 的具体函数形式,但若验证 ω 与 ω' 之间是线性相关的,则通过测量 ω 来检测以 ω' 为代表的手机天线特性的思路却是可行的.而要验证 ω 与 ω' 之间是否线性相关,用理论推导的方法是不现实的,因为理论推导又会使问题回到对式(4)中的 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} (即手机天线内部电磁场分布)的计算上来,由于目前使用的手机天线多为倒F天线(IFA)和平面倒F天线(PIFA),其形状很不规则,因而要计算其内的 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 是有很大难度的,所以用实验验证的方法反而直接和方便.

3 ω 与 ω' 线性相关的实验验证

3.1 验证思路和方法

验证思路和方法的步骤为:

(1) 先假设 ω 与 ω' 之间是线性相关的,并将其表示为

$$(\omega - \omega_0)/\omega_0 = k(\omega' - \omega'_0)/\omega'_0, \quad (11)$$

式中 k 为常数.

(2) 在同批生产的手机天线中取出20只,有意轻微地改变结构,人为造成辐射频率 ω' 各不相同,分别测

量它们的辐射频率 $\omega'_i (i = 1, 2, \dots, 20)$.

(3) 将这 20 只天线分别放入谐振腔, 测量谐振腔的谐振频率 $\omega_i (i = 1, 2, \dots, 20)$.

(4) 为了排除不同测试者操作带来的误差, 由 3 人在不同时段分别对 ω'_i 和 ω_i 进行一次测量.

(5) 分析 ω'_i 与 ω_i 间的相关性, 如果结果能够表明二者是线性相关的, 则称式(11)为推广的微扰谐振理论, 并以其作为检测手机天线性能一致性的理论基础, 否则, 寻找其他出路.

3.2 实验验证系统

手机天线辐射频率 ω'_i 的测量系统由矢量网络分析仪, 通用接口总线(GBIP)和计算机组成; 而谐振腔的谐振频率 ω_i 的测量系统由谐振腔、矢量网络分析仪、GBIP 和计算机组成, 其框图如图 1.

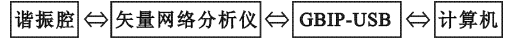


图 1 验证系统框图

谐振腔的原理结构如图 2. 可将电磁波耦合于腔内和测量谐振频率^[5].

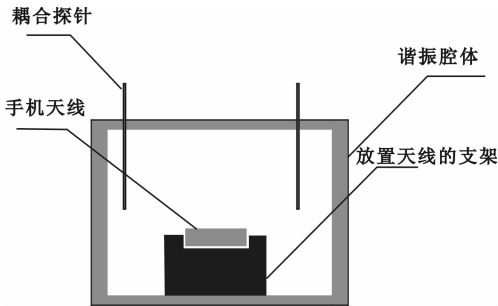


图 2 谐振腔结构示意图

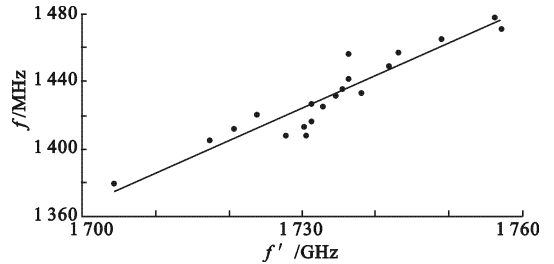


图 3 f' 与 f 间是相关性分析结果(测试者 1)

3.3 实验结果及相关性分析

测量结果列于表 1, 不过表中的数据不是以(角)频率 ω'_i 和 ω_i 的形式而是以(线)频率 f' 和 f 的形式给出. 在此, 对 f' 与 f 间的线性相关性分析是采用 DOE 软件来完成的^[6], 图 3 是对测试者 1 所测数据的分析结果. 分析结果表明, f' 与 f 间是线性相关的, 相关性为 0.938(3 名测试者测试结果的相关性为 0.930, 此处不再给出图示结果). 实验验证了 f' 与 f 间是线性相关的, 而这也正是所期望的结果, 从而说明了将推广的微扰谐振理论式(11)作为检测手机天线性能一致性的依据是成立的.

表 1 手机天线的辐射频率 f' 和将其放入谐振腔后谐振腔的谐振频率 f 的测量结果

天线序号	f' / MHz	f_1 / MHz	f_2 / MHz	f_3 / MHz	天线序号	f' / MHz	f_1 / MHz	f_2 / MHz	f_3 / MHz
1	1704.2	1379.3	1379.3	1379.3	11	1734.5	1432.0	1430.1	1433.4
2	1717.2	1404.6	1402.0	1400.9	12	1735.4	1435.7	1435.3	1435.8
3	1720.6	1411.9	1412.5	1413.9	13	1736.2	1441.9	1441.0	1443.1
4	1723.7	1421.1	1420.5	1420.7	14	1736.2	1456.5	1450.0	1454.5
5	1727.6	1407.8	1405.9	1408.0	15	1738.1	1433.1	1432.0	1435.7
6	1730.2	1412.8	1412.1	1412.3	16	1741.8	1449.4	1445.6	1448.3
7	1730.6	1408.0	1401.0	1403.3	17	1743.2	1457.3	1456.0	1455.0
8	1731.2	1416.2	1415.2	1414.8	18	1748.7	1464.8	1464.6	1477.5
9	1731.2	1426.7	1426.1	1427.7	19	1756.2	1477.7	1476.0	1476.0
10	1732.7	1425.2	1424.3	1425.2	20	1757.0	1471.1	1467.2	1471.5

4 手机天线性能一致性检测系统

由于图 1 所示的系统从实验角度验证了 f' 与 f 间是线性相关的, 所以按照图 1 所示的思路将其组建成仪器系统并附以相应的软件便成为手机天线性能一致性的检测系统. 系统中的矢量网络分析仪、GPIB 和计算机可直接购置, 而谐振腔需要自行设计和加工: 腔体由铝板制成, 腔内的长、宽和高分别为 $100 \text{ mm} \times 110 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$. 为了快速便捷, 通过气动动力系统操控腔体的底部, 使其从腔体高度方向开启和关闭腔

体. 开启是为了放置待检测天线, 关闭是为了构成完整的谐振腔以便测量放入天线后谐振腔的谐振频率. 为了使腔体在封闭时底部与腔体有良好的接触, 在可移动的底部边缘和腔体底部的边缘均粘贴有导电密封胶条. 在可移动的腔体底面的中心位置固定由尼龙材料制作的、用以放置待检测天线的支架, 以便使各待测天线处于腔内的同一位置. 位于腔体顶部的两根探针可以上下移动, 以调节耦合系数. 谐振腔及其附件结构如图4的照片所示.

5 结束语

理论分析表明, 将微扰谐振理论加以推广, 便可建立起手机天线的辐射频率与将其放入谐振腔后谐振腔的谐振频率间的关系式, 而实验结果表明两者是线性相关的, 因而将其作为手机天线性能一致性检测的理论基础不但是可行的而且是方便的. 基于这一理论基础, 建立了一套手机天线性能一致性检测系统, 该系统除可用于小型天线性能的检测外, 还可用于其他小体积样品特性的测量.

参考文献:

- [1] 林海立. 移动通信微波电路与天线的小型化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [2] Bank M, Levin B. The Development of Cellular Phone Antenna with Small Irradiation of Human-organism Tissues[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2007, 49(2): 65-73.
- [3] 梁昌洪, 谢拥军, 官伯然. 简明微波[M]. 第1版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 303-310.
- [4] 倪尔瑚. 介质谐振器的微波测量[M]. 第1版. 北京: 科学出版社, 2006: 48-49.
- [5] 谢拥军, 梁昌洪. 探针耦合谐振腔的谐振频率分析[J]. 西安电子科技大学学报, 1996, 23(2): 263-265.
Xie Yongjun, Liang Changhong. The Variation Solution of Resonate Frequency of the Probe-coupled Rectangular Cavity [J]. Journal of Xidian University, 1996, 23(2): 263-265.
- [6] 凯克·博特, 阿迪·博特. 世界级质量管理工具[M]. 遇今, 石柱, 译. 第1版. 北京: 中国人民大学出版社, 2004: 243-294.

(编辑: 齐淑娟)

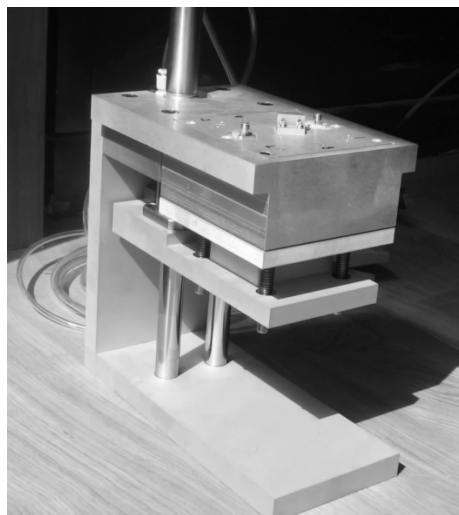


图4 附有启动装置的谐振腔体外形照片