

文章编号: 0255-8297(2007)05-0469-06

馈电结构可变化的频率可重构天线

丁霄¹, 姜兴¹, 李思敏², 方健贵¹

(1. 桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林电子科技大学 校长办公室, 广西 桂林 541004)

摘要: 提出一种馈电结构可实时变化的频率可重构天线, 利用 RF MEMS 开关控制天线模型中矩形加载槽的长度来实现频率可重构, 从天线等效 LC 振荡回路和谐振回路电流路径的改变等两方面分析了频率可重构原理。研究结果表明: 所设计天线能工作在 L、S 两波段 3 个频率段上, 即 bluetooth、DCS/GSM 和 GPS 频段。由于 3 个频段天线工作在同一模式下, 所以方向图几乎完全一致, 并且 RF MEMS 开关对馈线结构的调整可解决由于可重构而改变天线口径面辐射体结构带来的匹配问题, 使得天线具有良好的可重构特性的同时还满足高辐射增益, 实现了一副天线多功能的目的。

关键词: 馈电结构可变化; 频率可重构天线; RF MEMS 开关; 可重构原理

中图分类号: TN821 文献标志码: A

Frequency-Reconfigurable Antenna with Alterable Feed Configuration

DING Xiao¹, JIANG Xing¹, LI Si-min², FANG Jian-gui¹

(1. Department of Communication and Information Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. University Office, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The antenna introduced in this paper is frequency-reconfigurable and the feed configuration can be changed, with the length of a rectangular slot being changed using an RF MEMS switch. The principle of frequency reconfigurability is analyzed both from antenna's equivalent LC oscillation circuitry and from the changing route of resonant tank's current. The results indicate that the antenna can operate at three frequency bands: bluetooth, DCS/GSM and GPS, all in the L/S band. Due to the same radiation mode, the radiation pattern of the antenna operating in the 3 bands is exactly the same. Changeable feed configuration using RF MEMS switch can solve the matching problem directly originating from the change of radiator structure. The results also show that the antenna has good reconfigurability and high radiation gain. The antenna can be used for multiple purposes.

Keywords: alterable feed configuration; frequency-reconfigurable antenna; RF MEMS switch; reconfigurable principle

目前各种综合信息系统发展的重要方向之一就是大容量、多功能、超宽带。作为无线通信信息进出的咽喉——天线, 就越发重要了。现代无线通信和现代战争要求在有限空间范围内用同一天线实现多个天线才能实现的功能, 因此, “可重构天线”这一概念得以提出。可重构天线希望能在同一个通用天线口径中, 通过实时地改变口径中某些结构, 来获得所需要的天线, 从而达到“万能”的目的^[1]。近年来, RF

MEMS 开关的出现较好地解决了可重构天线中的几个难点, 并且 RF MEMS 技术与射频技术的结合为天线小型化带来了新的机遇, 可重构天线发展得到了质的飞跃^[2]。关于 RF MEMS 开关在文献[3]中有详细的介绍。可重构天线按照功能来分, 可分为 3 类: 第 1 类是方向图形状不变而频率可以改变的天线; 第 2 类是频率不变, 方向图形状可以改变的天线; 第 3 类是能同时改变频率和方向图的可重构天线^[4]。

收稿日期: 2007-01-31; 再修订日期: 2007-06-25

基金项目: 广西省自然科学基金(0342045); 广西教育厅科研项目(桂教科研[2002]22 号)资助项目

通信作者: 李思敏, 教授, 博导, 研究方向: 天线、微波测量、电磁计算, E-mail: siminl@guet.edu.cn

频率可重构天线即可重构天线的第1类.通常频率可重构天线能够在宽频带或多频段工作而天线远场方向图近似保持不变.

本文将设计一种馈电结构可实时变化的频率可重构天线.该天线采用微带缝隙耦合天线模型,利用RF MEMS开关的通断来改变天线口径面辐射体结构,同时在馈线上接入RF MEMS开关以便实时调节馈线结构,以解决天线口径面辐射体结构变化所带来的匹配问题,使得天线辐射效率能够保持在一个较高的数值.最终设计出工作在L波段和S波段上3个频率点的频率可重构天线.本文设计研究结果表明,可以用较为系统的方法运用RF MEMS开关来设计频率可重构天线,同时通过改变馈线结构来解决天线口径面辐射体结构变化所带来的匹配问题,使天线能够保持较小的尺寸,同时获得较高的天线辐射效率.

1 设计原理

1.1 设计模型和方案

所设计馈电结构可实时变化的频率可重构天线模型如图1所示.该模型是工作在2.4 GHz的微带缝隙耦合天线,图1(a)是该模型的俯视图,图1(b)是该模型的主视图.图1中变量的具体数值如下(单

位:mm),顶部贴片的宽和长分别为, $a = 25.5, b = 35.2$;中部地板开缝的长和宽分别为 $l_s = 15.84, W_s = 1.15$;缝隙与顶部贴片和底部馈线间两介质层的介电常数是 $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 2.54$,且厚度均为 $h_1 = h_2 = 1.6$.在微带缝隙耦合天线顶部贴片加载不同矩形槽缝,并在加载槽中设置一些RF MEMS开关,利用这些开关的通断来离散调节槽的长度,由于上述操作改变了辐射体的部分结构,所以天线能在不同的频率点上产生谐振,并且RF MEMS开关的通断可以控制,因此这些谐振频率也都可以控制,这就达到了频率可重构的目的,关于具体可重构原理,将在后续篇幅中详细分析.

此类型天线在微带贴片上矩形加载不同槽缝,其结构简单,制作简易.上面分析也表明,天线工作频率容易控制,因此研究人员已经开展了广泛的研、究^[5-7].加载槽长度的变化必然会引起天线结构的变化,而具有不同长度加载槽的天线的最佳馈电点和最佳馈电结构是不同的,如何改变馈电点和馈电结构以满足天线口径面辐射体结构变化所带来的匹配问题是目前普遍遇到的难点,也是本方案所面对的难点.在接下来的篇幅中,将详细阐述如何利用RF MEMS开关来实时改变馈线结构,以克服这一难点.

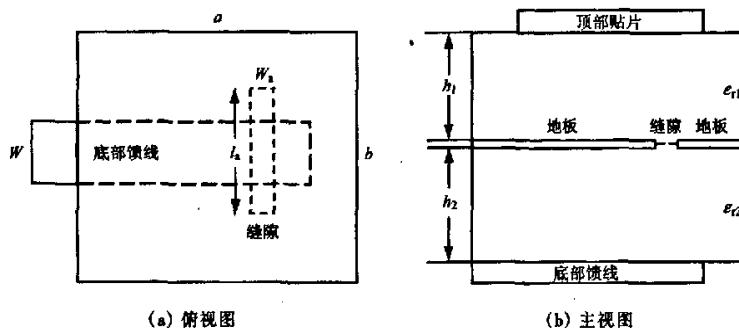


图1 频率可重构天线模型

Fig.1 Model of frequency-reconfigurable antenna

1.2 设计步骤

根据图1所示频率可重构天线的基本模型,预期经过两个步骤实现馈电结构可变化的频率可重构天线设计.

第1步:顶部贴片矩形加载槽以及槽内RF MEMS开关的放置.关于顶部贴片上加载矩形槽的位置,文献[8]的研究表明,根据平衡电流法可以找到不同模式下的共同匹配点,即在贴片上关于中心

对称开2个槽的天线模型能在2种开关模式下找到共同的匹配馈点.为此,我们在距离贴片短边均为 L_s 的位置关于贴片中心对称开槽,为便于描述,两开槽分别称为slit1和slit2.矩形槽缝的长度和宽度分别为 l_s 和 W_s ,每一个槽缝内分别放置4个RF MEMS开关并对其进行编号,开关从贴片边沿向中心依次编号为1、2、3、4.通过对RF MEMS开关1、2、3、4通断的调节就可以控制槽缝的长度.顶部贴片

矩形加载槽具体示意图见图2。

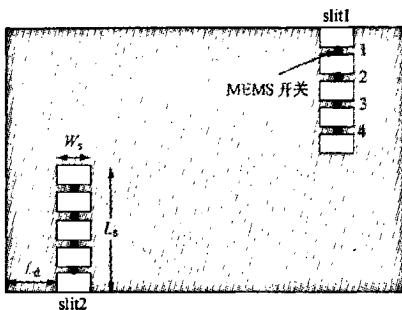


图2 顶部贴片加载槽及开关放置示意图

Fig.2 Place of slot and switch on the top patch

第2步:馈线结构的调整。加载槽的存在和变化必然会给天线带来新的匹配问题。微带缝隙天线采用微带线馈电,其中微带线通过介质基片同缝相短接或是在终端开路;缝隙通过1个可等效为理想变压器的缝隙与微带馈线之间的基板,并受微带传输线中传输的能量激励,再通过1个可以等效为理想变压器的缝隙和顶部贴片之间的基板,耦合能量到顶部贴片,辐射出能量。一般微带缝隙天线的阻抗可以分为贴片等效阻抗和缝隙等效阻抗2部分。文献[9,10]给出了微带缝隙天线阻抗的具体表达式,如下式

$$Z_{\text{in}} = \frac{n_2^2}{(n_1^2 Y_{\text{patch}} + Y_{\text{ap}})} - j Z_0 \cot(k_s l_s) \quad (1)$$

式中, n_1 、 n_2 是2个等效理想变压器的传输系数, Z_0 是天线特性阻抗, k_s 是波数因子, l_s 是馈线过缝隙的长度, Y_{patch} 和 Y_{ap} 则分别是贴片等效阻抗和缝隙等效阻抗, 文献[9,10]中详细给出了这些因子的解析表达式。

从式(1)可以看出,微带缝隙天线的阻抗与贴片等效阻抗和缝隙等效阻抗相关。由前面分析可知,加载槽长度的变化必然会引起天线结构的变化,天线结构的变化会导致整个缝隙天线阻抗的变化,即式(1)的值会发生变化。如果使得式(1)的值在一定频率范围内近似等于微带馈线的阻抗,那么匹配问题就迎刃而解了。因此,为了达到匹配的效果,就必须寻求1个新的微带馈线阻抗值使其近似等于式(1)变化后的值。我们知道,若采用同轴馈电,加工制作时一旦确定馈电点的位置,以后是很难再发生改变的;如果不改变馈电点的位置,同轴馈电又很难达到在宽频带范围内有很好的匹配这一要求。而微带缝隙天线采用微带线进行馈电,这种馈电方式既回避

了同轴馈电时需要在微带上穿孔,同时又可以通过RF MEMS开关来改变微带馈线的长度以调节微带馈线阻抗值,解决了缝隙天线阻抗变化后带来的匹配问题。

微带馈线结构的调整示意图如图3所示,微带馈线被2个RF MEMS开关分成3部分,长度分别为 L 、 L_1 和 L_2 ,2个MEMS开关分别记为A和B。其中, MEMS开关A用以连接长度为 L 和 L_1 的馈线, MEMS开关B用以连接长度为 L_1 和 L_2 的馈线。通过调节MEMS开关A和B的通断状态就可得到不同长度的微带馈线,以解决由于顶部贴片开关1、2、3、4通断引起的天线结构变化带来的阻抗匹配问题。

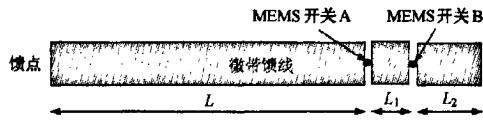


图3 馈线结构调整示意图

Fig.3 Alterable feed configuration

上述两步骤中,所有RF MEMS开关的外围驱动机制均采用静电驱动,静电驱动电压可通过DSP芯片加以控制。文献[8,11]的研究表明,由于RF MEMS开关具有优良的射频性能,故在仿真实验中,导通的理想RF MEMS开关可用矩形金属贴片代替,断开的理想RF MEMS开关则去掉该金属贴片,替代金属贴片的宽度为0.2 mm。

2 频率可重构原理

由于采用微带缝隙耦合天线模型,当天线工作在主模时,天线顶部贴片上的电流仅沿一个方向变化而另一个方向近似均匀分布,天线可等效为一个LC振荡回路。如果此时在微带线垂直于电流流动方向上加载矩形切槽,其效果可以等效为串联一个电感,这个附加的电感分量改变了原来天线的等效LC回路,使天线谐振频率下降。此外,还可以从谐振电流回路的改变来解释通过加载矩形切槽能降低天线谐振频率。当微带天线主模工作时,贴片表面电流沿某一个方向流动,此时在贴片上垂直于电流流动方向加载矩形切槽,原来贴片表面的电流路径被切断,电流将绕过矩形切槽流动,从而电流流动的有效长度比没有受到扰动的原电流路径增加,贴片的有效长度增加,相应的工作频率降低。文献[8]的研究也表明,天线的谐振频率会随着槽切口长度的变化而

变化,随着槽长度的增加,天线最低模式的工作频率会下降。

3 设计结果与分析

运用 Ansoft HFSS 进行仿真实验,矩形加载槽的长度和宽度以及位置分别为: $L_s = 12$ mm, $W_s = 1$ mm, $L_d = 9.5$ mm。拟设计的天线在 L 波段和 S 波段 3 个频率点频率可重构工作。这 3 个工作频率点分别为: $f_{01} = 2.4$ GHz, $f_{02} = 1.85$ GHz 和 $f_{03} = 1.57$ GHz, 为满足匹配要求,3 个工作频率点所对应的微带馈线尺寸可通过经验公式^[12]或者利用 ADS linecalc 工具箱计算,计算结果如下。

(1) 工作频率在 $f_{01} = 2.4$ GHz 时,微带馈线的长度为 $L = 70$ mm,宽度为 $W = 4.95$ mm;

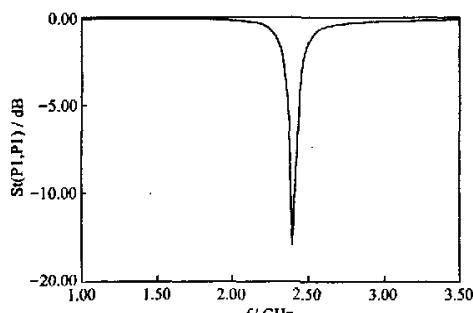
(2) 工作频率在 $f_{02} = 1.85$ GHz 时,微带馈线的长度为 $L + L_1 + 0.2 = 70 + 7.5 + 0.2 = 77.7$ mm,宽

度为 $W = 4.95$ mm;

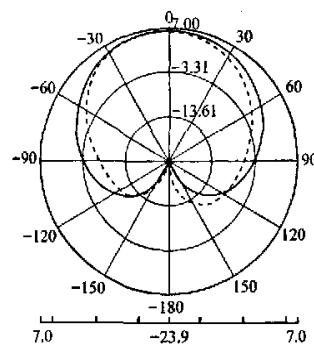
(3) 工作频率在 $f_{03} = 1.57$ GHz 时,微带馈线的长度为 $L + L_1 + L_2 + 2 \times 0.2 = 70 + 7.5 + 4.4 + 2 \times 0.2 = 82.3$ mm,宽度为 $W = 4.95$ mm。

仿真实验分 3 步来进行。

第 1 步:slit1 和 slit2 的所有开关全部闭合,即微带贴片没有加载矩形切槽,底部微带馈线长度为 L ,即图 3 微带馈线上开关 A 和 B 全断开。此时工作频率为 $f_{01} = 2.4$ GHz,通过仿真得到此时天线端口回波损耗以及 E 面辐射方向图,如图 4 所示。从图 4(a)、4(b)中可以看出,天线准确地工作在 2.4 GHz 左右,该频率段是无线局域网(WLAN)的 IEEE802.11b&g 协议、蓝牙技术(bluetooth)以及 CDMA 系统所需频段。在工作频率点上天线端口反射系数小于 -10 dB,天线辐射朝上,天线辐射相对增益最大值达到了将近 7 dB。



(a) 天线端口回波损耗图



(b) 辐射方向图(E 面)

图 4 所有开关全部闭合时天线端口和远场特性图

Fig.4 Antenna's port and far field characteristic with all switch close

第 2 步:slit1 和 slit2 的开关 3 和 4 均闭合,1 和 2 均断开。所设计天线工作在 $f_{02} = 1.85$ GHz。由于天线辐射体结构发生了变化,导致了天线和馈线的不匹配。根据前面的分析,需要改变微带馈线的结构或者馈电点位置以达到最佳匹配效果。通过前面的计算可知,在这种情形下,微带馈线的长度应为 $L + L_1 + 0.2 = 77.5$ mm,即图 3 微带馈线上开关 A 闭合,开关 B 断开。通过仿真得到天线端口回波损耗和 E 面辐射方向图,如图 5 所示。从图 5(a)、(b)中可以看出,天线很好地工作在 1.85 GHz 左右,该工作频段属于分布式控制系统(DCS)所需频段。适当微调开关位置,可将工作频率提升到 GSM 1900 系统工作频段上。天线在工作频率点上,端口回波损耗小于 -10 dB,天线辐射相对增益最大值达到近 5 dB。

如果不通过 RF MEMS 开关 A 和 B 来调节微带馈线结构而采用第 1 步同样的馈线结构,即图 3 微带馈线上开关 A 和 B 全断开。此时可得天线端口回波损耗图和 E 面远场辐射方向图,如图 6 所示。从图 6(a)、(b)中可以看出,虽然天线辐射方向图几乎没有发生变化,但是由于没有调整微带馈线的结构,就出现了前面分析所描述的匹配问题,矩形加槽微带缝隙耦合天线失配,天线相对增益最大值为 1 dB,比图 5(a)所示调节馈电线后的最大相对增益小了近 4 dB。同时图 6(a)还显示,此时天线在 1.85 GHz 附近端口回波损耗仅为 -4 dB。可见通过调节微带馈线上 RF MEMS 开关 A 和 B 可以满足贴片开槽后天线

结构变化带来的匹配问题。

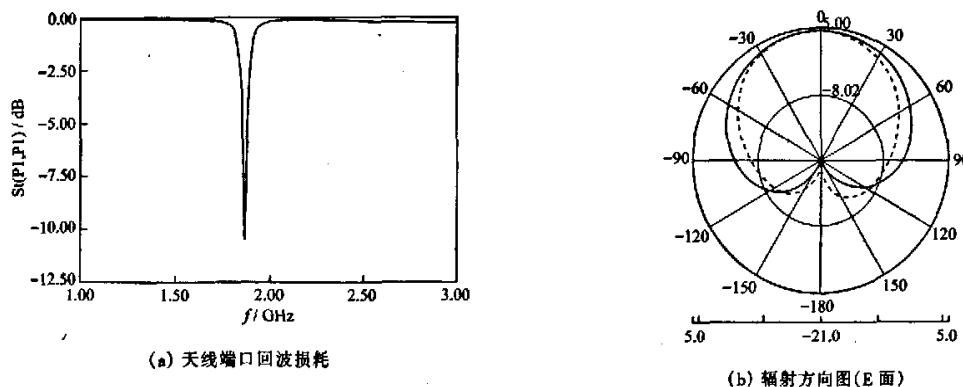


图 5 部分开关闭合时天线端口和远场特性图

Fig.5 Antenna's port and far field characteristic with part switch close

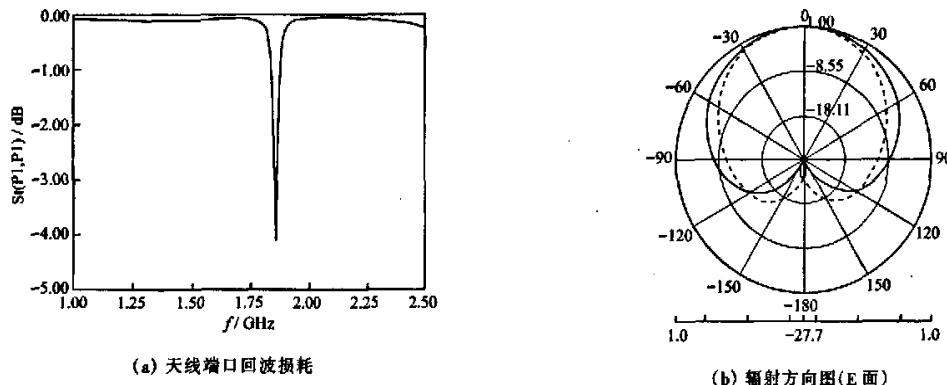


图 6 未调节馈线时天线端口和远场特性图

Fig.6 Antenna's port and far field characteristic without adjusting feed configuration

第3步:slit1 和 slit2 的开关 1、2、3、4 全部断开, 和 B 均闭合。通过仿真得到天线端口回波损耗和天线工作在 $f_m = 1.57$ GHz。微带馈线的长度为 $L_1 + L_2 + 2 \times 0.2 = 82.3$ mm, 即微带馈线上开关 A

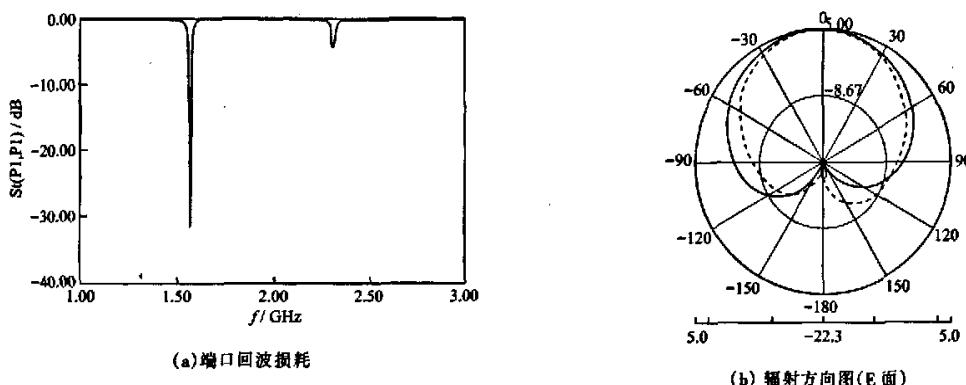


图 7 开关全部断开时天线端口和远场特性图

Fig.7 Antenna's port and far field characteristic with all switch open

从图 7(a)、(b)可以看出,天线准确工作在 1.57 GHz 附近,该频段属于 GPS 通信系统频段。天线在工作频率点上,端口回波损耗小于 ~ 30 dB,天线辐射相对增益最大值达到了 5 dB。

比较图 4(b)、图 5(b)和图 7(b),所设计的矩形加槽微带缝隙耦合天线通过调节 slit1 和 slit2 上 RF MEMS 开关的通断状态,就可以在 L 波段和 S 波段 3 个频率点上以几乎完全相似的方向图工作,从而达到了频率可重构天线设计的目的。同时,通过 RF MEMS 开关来实时调节微带馈线的结构,使馈线在这 3 个频率点上能解决由于天线结构变化而带来的匹配问题,天线在所设计的 3 个频率点上都有很高的辐射增益。

4 结语

本文系统地提出了一种频率可重构天线设计方法,并通过设计实例给出了工作在 L 波段和 S 波段 3 个频率点上的频率可重构天线。设计主体基于频率可重构思想,通过 RF MEMS 开关的通断对馈线结构进行调整,很好地解决了由天线结构变化带来的匹配问题,使得天线在所设计的 3 个频率点上都有很高的辐射增益。设计达到了预期效果:将一副天线以相似的方向图应用到 2 个不同频段的 3 个频率点上,实现了多个天线才能实现的功能。

所设计的天线可用于 bluetooth 技术和 DCS/GSM 系统以及 GPS 无线通信系统前端、综合大型会展网络无线接入等场合。在此基础上,对所设计的一种馈电结构可变化的频率可重构天线进行相关实验测试以验证设计方案,是今后研究工作的重点之一。

参考文献:

- [1] 肖绍球,王秉中.微带可重构天线初步探讨[J].电波科学学报,2002,17(4):386-390.
- [2] BROWN E R. RF-MEMS switches for reconfigurable integrated circuits [J]. IEEE Transactions on Microwave and Techniques, 1998, 46(11):1868-1880.
- [3] 李德胜,王东红,孙金伟,金鹏. MEMS 技术及其应用 [M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002:23-39.
- [4] 杨雪松,王秉中.可重构天线的研究进展[J].系统工程与电子技术,2003,25(4):417-421.
- [5] ABDALLAH A S, MOHAMMED Y E, LIU Yuanan. Study of multi-band property of rectangular microstrip patch antenna having different numbers of wide slots [J]. Journal of Southeast University(English Edition), 2004, 20(5):10-15.
- [6] ZHANG Xuexia, YANG Fan. Study of a slit cut on a microstrip antenna and its applications [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1998, 8(4):297-230.
- [7] DIMITRIOS E A. RF-MEMS reconfigurable self-similar antennas—design, analysis and measurements, synthesis using a neural network technique [D]. New Mexico: The University of New Mexico Albuquerque, 2005.
- [8] 陈燕仙. MEMS 开关可重构天线的研究与设计[D]. 上海:华东师范大学,2005.
- [9] COHN S B. Slot line on a dielectric substrate [J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 1969, 17(5):768-778.
- [10] HIMDI M, DANIEL J P, TERRE C. Transmission line analysis of aperture-coupled microstrip antenna [J]. Electronics Letters, 1989, 25(18):1229-1230.
- [11] PANAIAT P, PANOIA P, LUXEY C. MEMS-based reconfigurable antennas [J]. IEEE Proc International Symposium on Industrial Electronics, 2004, 1(1):175-179.
- [12] JAMES J R, HALL P S, WOOD C. Microstrip antenna theory and design [M]. London and New York: The Institution of Electrical Engineers, 1981.
- [13] PEROULIS D, SARABANDI K, KATECHIL P B. Design of reconfigurable slot antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(2):645-654.
- [14] 中华人民共和国信息产业部. 中华人民共和国无线电频率划分规定(信息产业部令第 14 号)[S]. 2006.

(编译:欧阳丽霞)

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)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)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、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),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>