

# Hilbert 缝隙天线的频率可重构设计

顾长青 韩国栋

(南京航空航天大学信息科学与技术学院,南京,210016)

**摘要:**设计了一种在Hilbert 缝隙上加载RF MEMS(Micro electrical mechanical systems)开关实现频率重构的微带天线。运用Ansoft HFSS 软件,缩减了原来天线接地面的尺寸,利用RF MEMS 开关控制天线上Hilbert 缝隙长度来实现频率重构。设计的该天线工作在GPS/DCS/PCS/Blue Teeth 以及 IEEE802.11b&g/IEEE802.11a 等5 个不同的频段。还讨论了用金属片和等效的电路参数分别表示理想和非理想RF MEMS 开关所得的 $S_{11}$ 参数曲线,并进行比较。就方向图而言,由于GPS/DCS/PCS 频段天线工作在同一模式下,所以方向图完全一致,而工作于高次模式的Blue Teeth 以及 IEEE802.11b&g/IEEE802.11a 频段,方向图明显不同。最终通过在Hilbert 缝隙天线上加载RF MEMS 开关后,实现了将一副天线应用到无线通信中5 个频段的目的。

**关键词:**微带天线;Hilbert 缝隙;频率重构;RF MEMS;等效电路参数

中图分类号:TN822 文献标识码:A 文章编号:1005-2615(2006)06-0660-06

## Design of Frequency Reconfigurable Hilbert Fractal Slot Antenna

Gu Changqing, Han Guodong

(College of Information Science and Technology, Nanjing University  
of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** A frequency reconfigurable antenna by fabricating RF MEMS (Micro electrical mechanical systems) switches on the substrate is proposed. The antenna has a reduced ground size and the length of the Hilbert fractal slot is changed by RF MEMS switches. The frequency reconfigurable antenna can operate at 5 different frequency bands, including GPS, DCS, PCS, Blue Teeth (and IEEE802.11b&g) and IEEE802.11a bands. The RF MEMS switches with metal patches and equivalent circuit parameters are replaced to simulate the values of  $S_{11}$ parameters using Ansoft HFSS, respectively. Results agree well with each other in different bands. The radiation patterns of the antenna operating at the GPS/DCS/PCS bands are exactly uniform due to a same radiation mode different from those of Blue Teeth (or IEEE802.11b&g) and IEEE802.11a because the antenna works at two different higher order modes. Finally, by use of the RF MEMS switches in the Hilbert fractal slot antenna, it can operate at five different frequency bands in wireless communication system.

**Key words:** microstrip antenna; Hilbert slot; frequency reconfiguration; RF micro electrical mechanical systems; equivalent circuit parameters

## 引言

现代大容量、多功能、超宽带综合信息系统的迅速发展,使同一平台上搭载的信息子系统和天线的

数量急骤增多。从降低系统的整体成本、减轻重量、减小平台雷达散射截面、实现良好的电磁兼容性等方面考虑,这种现象非常有害,也成为制约综合信息系统进一步发展的一大“瓶颈”<sup>[1-3]</sup>。就软件无线电系

基金项目:江苏省自然科学基金(BK2002093)资助项目。

收稿日期:2006-06-26;修订日期:2006-09-26

作者简介:顾长青,男,教授,博士生导师,1958年生,E-mail:Gucq0138@sina.com。

万方数据

统来说,使用一副宽带、超宽带天线完成在全部无线通信频段内的无障碍通信,在当前技术水平下难以实现,目前仍采用的是多频段组合式天线。近年来,新兴发展的RF MEMS开关是一种高度小型化的器件,可以取代天线中高成本、大体积的PIN二极管、超宽带场效应晶体管和真空继电器,在实现宽带、超宽带天线设计中凸显优势。RF MEMS开关还具有低损耗、高隔离度与体积小等优点。

近几年,国内外学者对天线的重构技术做了大量的研究。文献[4-6]主要讨论了用PIN管对圆缝隙天线和馈线重构后,天线工作在无线局域网(WLAN)的不同频点时其方向图的改变情况。文献[7-8]通过在折线形缝隙天线上加载PIN管,改变缝隙的长度,达到了改变天线谐振频率和方向图的目的。更多的学者致力于将RF MEMS开关用于天线或者天线阵,实现天线频率或者方向图的重构,使天线成本降低<sup>[9-17]</sup>。

本文在Hilbert缝隙天线上加载RF MEMS开关,通过DSP芯片控制元器件来改变不同位置上开关的通断状态,使天线分别工作在GPS/DCS/PCS/Blue Teeth(包括CDMA, IEEE 802.11b&g)以及WLAN的IEEE 802.11a协议等5个不同的频段。本文分别讨论了加载理想和非理想RF MEMS开关对天线工作频率的重构问题,并就方向图做了比较,其中采用了文献[13]所介绍的高性能RF MEMS开关,最终达到了用一副天线替代多副天线的目的。在设计过程中,本文使用的是基于切向矢量有限元法的Ansoft HFSS软件,该软件通过对目标体进行四面体网格剖分,运用有限元-边界积分法首先计算出天线近场,然后再推算出远场,从中得到特征阻抗、传播系数、S参数及电磁场、辐射场和天线方向图等结果。

## 1 Hilbert 缝隙天线的验证

分形结构自身具有相似性,拥有此结构的缝隙天线能够在有限的区域内形成较大的覆盖长度。所以,高阶的Hilbert缝隙天线亦能实现天线的小型化<sup>[2]</sup>。

图1为文献[1]中图10的天线模型,它是一种在地面上蚀刻三阶Hilbert缝隙的微带天线。具体参数为:介质基板的高度 $h=0.837$  mm,介质板材料为Duroid 5880( $\epsilon_r=2.2$ ),缝隙长度 $L=31.75$  mm,缝隙宽度 $W=2.0$  mm,地面上的大小为 $P_x \times P_y=10$  cm $\times$ 10 cm。采用了 $L_x=27.5$  mm、 $T_x=1.5$  mm、 $W_L=2.55$  mm的“T”形微带馈电方式。图2给出了Ansoft HFSS软件的仿真结果和文献的仿

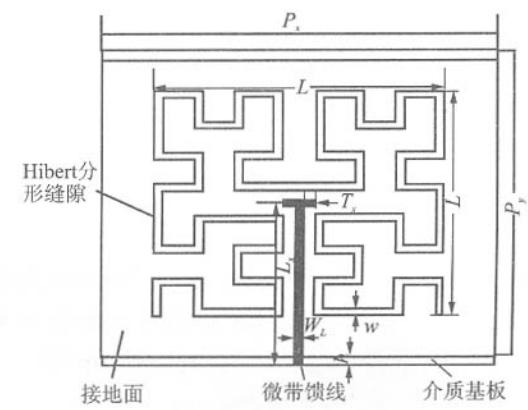


图1 Hilbert缝隙天线示意图

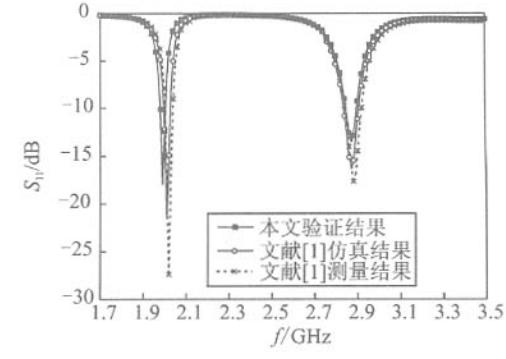


图2 本文的验证曲线和文献[1]的仿真、测试曲线

真、测试结果,证明了软件应用的正确性。

## 2 频率可重构的实现过程

Hilbert缝隙上的开关断开和闭合改变了地面上电流的流径,从而改变了天线的谐振频率,也对天线的输入阻抗产生影响,因此开关应尽量远离馈线的边缘。本文固定馈线的位置,设计的模型只具有一个地面上和一段馈线,即可达到频率重构和天线小型化的要求。

为了使所研究的天线工作在需要的频段,对图1的部分参数进行调整。首先缩减地面上的大小,由原来的 $P_x \times P_y=10$  cm $\times$ 10 cm缩减为 $P_x \times P_y=5$  cm $\times$ 5 cm,实现了天线的小型化。为了达到天线输入阻抗的匹配,通过不断优化馈线顶端“T”形的尺寸 $T_x$ 以及馈线伸入介质板的长度 $L_x$ ,发现当 $T_x=1.8$  mm,  $L_x=26.3$  mm时,可以在研究的5个频段内实现良好的阻抗匹配。其他参数为:Hilbert缝隙长度 $L=30$  mm,宽度 $W=2.5$  mm;介质板的高度 $h=1.6$  mm,材料为FR4( $\epsilon_r=4.4$ )。为了实现微带线的50 Ω匹配,馈线宽度 $W_L=3.06$  mm。

文献[13,16,17]指出,由于RF MEMS开关具

有优良的射频性能,在仿真设计中,导通的理想RF MEMS开关可用一矩形金属贴片代替,断开则去掉该金属贴片,贴片宽度为0.2 mm。为了不改变工作在同一模式时天线的方向图,本文在 Hilbert 缝隙上对称地使用8对(16副)RF MEMS开关,编号分别为 $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2, e_1, e_2, f_1, f_2, g_1, g_2, h_1, h_2$ ,图3给出了加载在缝隙上RF MEMS开关的位置示意图。其中 $L' = L - W = 27.5$  mm,各开关的位置通过如下得出:设 $A_1, A_2$ 为缝隙的开路端,图中虚线为缝隙的中心线,根据文献[18]给出的n阶Hilbert分形结构的计算公式(这里n=3),按 $d = \frac{L'}{(2^n - 1)}$ 计算出每对RF MEMS开关距缝隙开路端 $A_1$ 或 $A_2$ 的距离。具体数值为 $L_{a_1 A_1} = 17.5$  mm,  $L_{b_1 A_1} = 23.4$  mm,  $L_{c_1 A_1} = 38.2$  mm,  $L_{e_1 A_1} = 45.2$  mm,  $L_{f_1 A_1} = 60.9$  mm,  $L_{g_1 A_1} = 77.8$  mm,  $L_{d_1 A_1} = 92.6$  mm,  $L_{h_1 A_1} = 100.2$  mm。以上长度均为开关沿着缝

隙的中心线到对应开路端的距离。由对称关系,标号为2的开关到 $A_2$ 的距离与标号为1的开关到 $A_1$ 的距离对应相等。不同工作状态下开关的通断形式如表1所示。

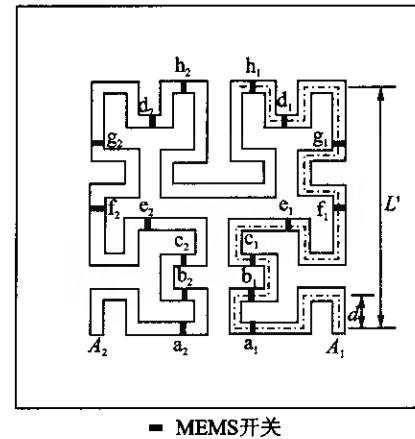


图3 RF MEMS开关的位置示意图

表1 工作不同频段时,RF MEMS开关的通断状态

状态	$a_1, a_2$	$b_1, b_2$	$c_1, c_2$	$d_1, d_2$	$e_1, e_2$	$f_1, f_2$	$g_1, g_2$	$h_1, h_2$	工作频段
①	断开	GPS							
②	断开	导通	断开	导通	断开	断开	断开	断开	DCS
③	断开	断开	导通	导通	断开	断开	断开	断开	PCS
④	断开	断开	断开	导通	导通	断开	断开	断开	2.4 GHz 频段
⑤	导通	断开	断开	断开	导通	导通	导通	导通	IEEE802.11a

## 2.1 理想RF MEMS开关的频率重构

在状态①时,所有开关都断开,此时缝隙长度最长,等效磁流的路径也最长。因此可以得到最低的谐振频率。对于工作在GPS频段的通信系统,其频段要求 $f=1.57\sim1.58$  GHz。本文所得到的 $S_{11}$ 曲线如图4的曲线(1)所示,在 $S_{11}\leq-10$  dB时,天线的可实用频段为1.54~1.59 GHz,包含了GPS频段。

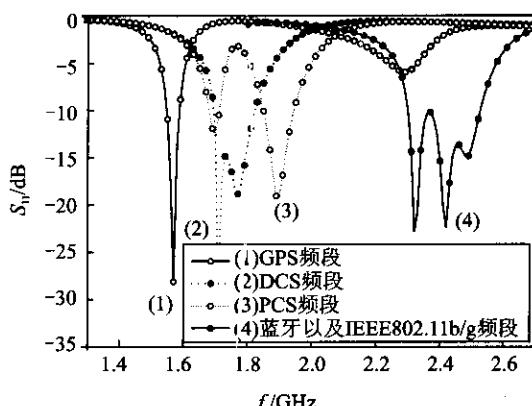


图4 状态①~④ 理想RF MEMS所得的 $S_{11}$ 曲线

隙的中心线到对应开路端的距离。由对称关系,标号为2的开关到 $A_2$ 的距离与标号为1的开关到 $A_1$ 的距离对应相等。不同工作状态下开关的通断形式如表1所示。

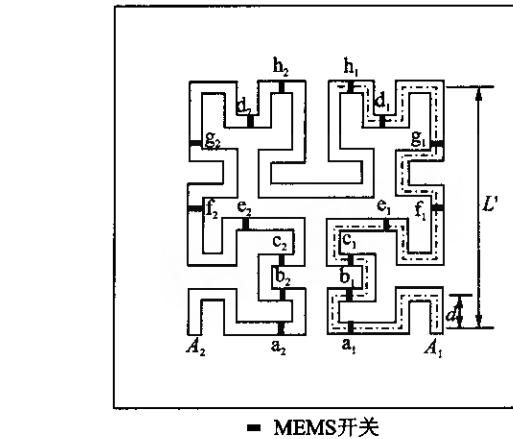


图3 RF MEMS开关的位置示意图

在状态②时,开关 $b_1, b_2, d_1, d_2$ 导通,其余开关断开,缝隙长度有所减小,等效磁流的平均流径也将减小。因此可以得到相对较高的频率,如图4的曲线(2)所示,在 $S_{11}\leq-10$  dB时,天线工作的频段为1.71~1.85 GHz。这也是分布式控制系统(DCS)所需的频段。

状态③中,开关 $c_1, c_2, d_1, d_2$ 导通,其余断开,天线的谐振频率进一步升高,如图4的曲线(3)所示。 $S_{11}\leq-10$  dB的天线工作频段为1.87~1.95 GHz。PCS以及GSM1900系统均工作在此频段内。

而状态④则表示, $e_1, e_2, d_1, d_2$ 导通,其余开关断开,可以得到如图4的曲线(4)所示的包含2.4 GHz的较宽频带。2.4 GHz频段(2.4~2.485 GHz)是现在许多通信系统所需的:无限局域网(WLAN)的IEEE802.11b&g协议,蓝牙技术(Blue Teeth)以及CDMA系统。从图中看出,在 $S_{11}\leq-10$  dB时,天线工作的频段为2.3~2.52 GHz,已远远包含了上述系统所需的频宽。

状态⑤中: $a_1, a_2, e_1, e_2, f_1, f_2, g_1, g_2, h_1, h_2$ 导

通,此时缝隙被分成几部分,等效磁流的平均流径最短,因此得到了所研究的最高频段,  $S_{11}$  参数曲线如图5的曲线(2)所示。 $S_{11} \leq -10$  dB 时天线的工作频段为 5.15~5.9 GHz,这也是 IEEE802.11a 协议所使用的频段。

从上述看出,通过调整不同组合的理想 RF MEMS 开关的通断状态,可以使天线工作在实际通信应用的 5 个不同频段。

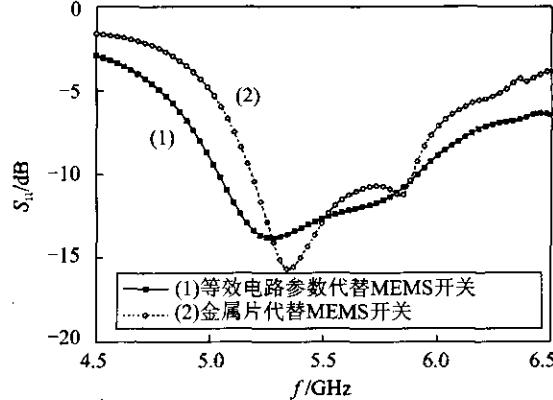


图 5 状态⑤两种方案所得的  $S_{11}$  曲线

## 2.2 非理想 RF MEMS 开关的频率重构

非理想的 RF MEMS 开关会引入一定的电路参数值。文献[13]提供了一种串联式 RF MEMS 开关。当 MEMS 开关处于断开状态时,没有电压激励,上电极悬梁保持在原来的位置,等效电路相当于串联一个电容;而 MEMS 导通时,在脉冲电压的激励下电流通过开关的悬臂,引起悬梁电阻处局部区域的温度升高,而使悬梁两端弯曲,从而使开关导通,此时等效电路相当于一个很小的电阻。这里热效应所需的脉冲电压仅为 2 V。对于此类 RF MEMS 开关的特性,文献[13]亦作了仿真和测量,仿真时用一个简单的 LC 回路表示,仿真结果和测量结果吻合得很好。在断开状态下,频率  $f=2$  GHz 时,隔离度低于  $-50$  dB,此时的隔离电容为  $C_{off}=2$  fF;在导通时,引入的插入损耗仅为 0.25 dB,等效电阻为  $R_{on}=3$   $\Omega$ 。

本文用等效电路参数来模拟真实的 RF MEMS 开关,即接入  $C_{off}=2$  fF 的电容表示断开,接入  $R_{on}=3$   $\Omega$  表示导通,得到了各个频段的  $S_{11}$  参数曲线图。从图 5~7 中看出,用等效电路参数代替 RF MEMS 开关得到的结果与用金属片代替 RF MEMS 开关所得的结果相比,在 GPS 频段和 DCS 频段差异很小,在 PCS 频段,非理想 RF MEMS 开关引入的参数值使天线在  $f=1.9$  GHz 的谐振性能有一定的改善,带宽有所增加。同样,在 2.4 GHz 频

段也改变了天线的谐振性能。而从图 5 中看出,用两种替代 RF MEMS 开关的方法所得的  $S_{11}$  曲线基本走势一致,但是带宽有所展宽,这是由于在导通时引入的  $R_{on}=3$   $\Omega$ ,明显地降低了天线的 Q 值。所以,  $S_{11} \leq -10$  dB 时在 5 个频段的总带宽要大于理想 RF MEMS 开关时的带宽。从所得的结果看出,用金属片代替 RF MEMS 开关的天线输入特性仍然可以作为实际 RF MEMS 开关情况的参考。

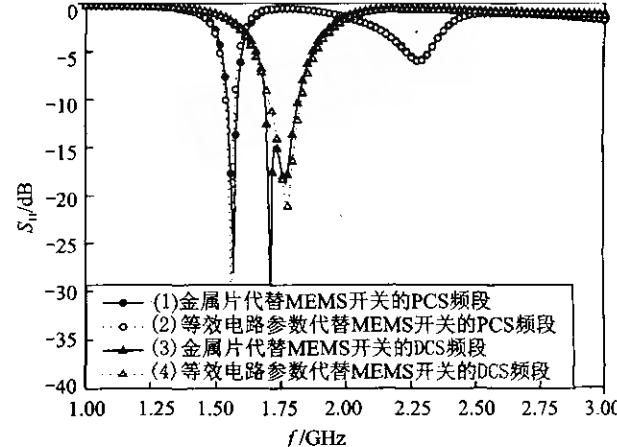


图 6 状态①②两种方案所得的  $S_{11}$  曲线

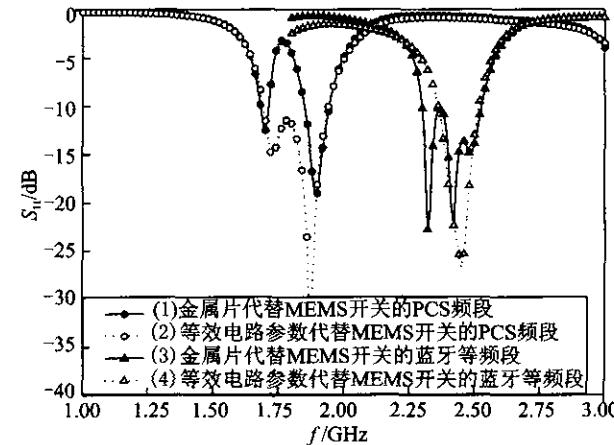


图 7 状态③④两种方案所得的  $S_{11}$  曲线

## 2.3 各频段的方向图

不同位置上 RF MEMS 开关的通断改变了 Hilbert 缝隙的长度,也改变了电抗值的大小,使得天线的工作频率发生了变化。在 GPS, DCS 和 PCS 频段,天线工作在同一个低阶模式下不同频率。2.4 GHz 频段是天线工作在高次模式,而 5.15~5.9 GHz 则为更高的模式。所以通过改变 RF MEMS 状态, GPS(1.57 GHz), DCS(1.8 GHz) 和 PCS(1.9 GHz) 频点的方向图理论上应该完全一样,实际的仿真结果也是如此,其方向图如图 8 所示。由于 2.4 GHz, 5.15~5.9 GHz 频段是天线工作不同的

高次模式,因此方向图有所变化,如图9,10所示。

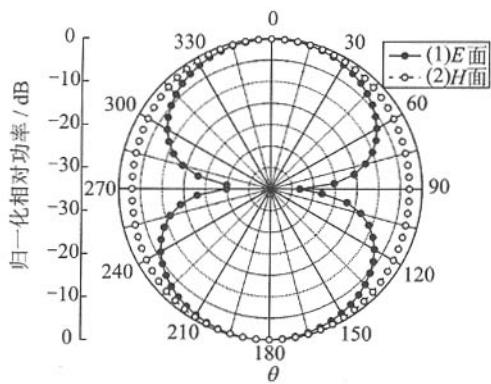


图8 GPS/DCS/PCS 频段

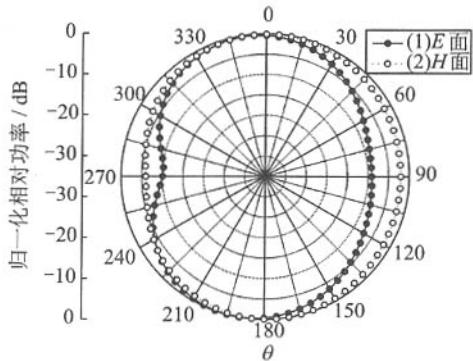


图9 蓝牙等频段

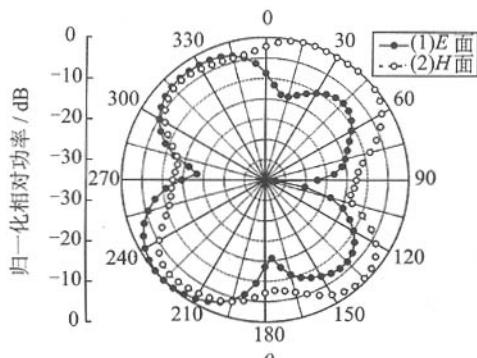


图10 IEEE802.11a 频段

同频率,Blue Teeth/IEEE802.11b&g 工作在次高模式,IEEE802.11a 则工作在最高模式,这3个模式的方向图明显不同。研究表明,运用MEMS 开关后,可以实现将一副天线应用到无线通信的5个不同频段,达到了代替多副天线、降低天线成本的目的。

在此基础上,对设计的频率可重构的 Hilbert 缝隙天线制作模型并进行试验验证,是以后研究工作的一项内容之一。

### 参考文献:

- [1] Sayem A T M, Ali M. Characteristics of a microstrip-fed miniature printed Hilbert slot antenna[C]// Progress in Electromagnetic Research (PIER). Tokyo, Japan:[s. n.], 2006:1-18.
- [2] Sayem A T M, Ali M. A dual-band Hilbert slot antenna for GPS and blue tooth application [C]// Antennas and Propagation Society International Symposium. Washington, DC, USA: IEEE, 2005, 4: 44-473.
- [3] 肖绍球,王秉中. 微带可重构天线的初步探讨[J]. 电波科学学报,2002,17(4): 386-390.
- [4] Nikolaou S, Bairavasubramanian R, Cesar L J. Pattern and frequency reconfigurable annular slot antenna using PIN diodes [J]. Transactions on Antennas and Propagation IEEE, 2006, 54(2-1): 439-448.
- [5] Nikolaou S, Ponchak G E, Papapolymerou J, et al. Shorted annular slot antenna (ASA) matched at three different frequencies [C]// IEEE-APS Symposium. Washington, DC, USA: IEEE, 2005: 541-544.
- [6] Nikolaou S, Ponchak G E, Papapolymerou J, et al. Design and development of an annular slot antenna (ASA) with a reconfigurable radiation pattern [C]// APMC 2005 Asia-Pacific Microwave Conference. Suzhou, China: IEEE, 2005.
- [7] Peroulis D, Sarabandi K, Katehi P B. A planar VHF reconfigurable slot antenna [C]// Antennas and Propagation Society International Symposium. Boston, USA: IEEE, 2001, 1: 154-157.
- [8] Peroulis D, Sarabandi K, Katehi P B. Design of reconfigurable slot antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(2): 645-654.
- [9] Ali M A, Wahid P. A reconfigurable yagi array for wireless applications[C]// Antennas and Propagation Society International Symposium. San Antonio, Texas, USA: IEEE, 2002, 1: 466-468.

### 3 结束语

本文使用 Ansoft HFSS 软件对缝隙天线进行仿真,缩减了原来天线接地面的尺寸,通过在缝隙上加载 RF MEMS 开关,改变了 Hilbert 缝隙的状态,将天线应用在 5 个不同的频段:GPS/DCS/PCS/Blue Teeth 以及 IEEE802.11b&g/IEEE802.11a。将非理想RF MEMS 开关的等效参数应用到天线后,所得的  $S_{11}$  结果表明,理想的 MEMS 开关可以代替实际的开关。在天线工作的 5 个频段中, GPS/DCS/PCS 工作在同一模式下的不

- [10] Oswald M T, Hagness S C, Van Veen B D, et al. Reconfigurable single-feed antennas for diversity wireless communications [C]// Antennas and Propagation Society International Symposium. San Antonio, Texas, USA: IEEE, 2002, 1: 469-472.
- [11] Kiriazi J, Ghali H, Ragaie H, et al. Reconfigurable dual-band dipole antenna on silicon using series RF MEMS switches [C]// Antennas and Propagation Society International Symposium. Columbus, Ohio, USA: IEEE, 2003, 1: 403-406.
- [12] 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.
- [13] Panaiat P, Luxey C, Jacquemodt G. RF MEMS-based reconfigurable antennas [C] // Industrial Electronics International Symposium. Ajaccio, France: IEEE, 2004, 1: 175-179.
- [14] Manimegalai B, Periyasamy V, Vishwanathan L, et al. A novel RF MEMS based fractal antenna for multiband wireless applications [C]// Asia-Pacific Microwave Conference. Suzhou, China: IEEE, 2005.
- [15] 张玮, 崔鸿波, 刘刚. 射频 RF MEMS 技术及其应用 [J]. 电子科学技术评论, 2005, 3: 27-31.
- [16] 肖绍球. 平面型可重构天线研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2003.
- [17] 陈燕仙. RF MEMS 开关可重构天线的研究和分析 [D]. 上海: 华东师范大学, 2005.
- [18] Vinoy K J, Jose K A, Varadhan V K, et al. Resonant frequency of Hilbert curve fractal antennas [C]// Antennas and Propagation Society International Symposium. Boston, USA: IEEE, 2001, 3: 648-651.

## 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](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>