

文章编号 1005-0388(2002)04-0386-05

# 微带可重构天线的初步探讨<sup>\*</sup>

肖绍球 王秉中

(电子科技大学应用物理研究所, 四川 成都 610054)

**摘要** 引入了一种崭新的天线概念—可重构天线。首先根据传统微带天线腔模理论定性地分析了微带可重构天线的工作机理, 然后用时域有限差分(FDTD)法对微带天线的可重构特性进行了仿真分析。仿真和分析表明: 矩形微带可重构天线当某一边长大于等于一个工作波长时, 能够获得良好的可重构特性。

**关键词** 可重构天线, 微带天线, 腔模理论, 时域有限差分法

中图分类号 TN821 文献识别码 B

## Preliminary research on microstrip reconfigurable antenna

XIAO Shao-qiu WANG Bing-zhong

(Institute of Applied Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China)

**Abstract** A new concept antenna, reconfigurable antenna, is introduced in this paper. Firstly qualitative analyses on the principle of microstrip reconfigurable antennas are done using microstrip antenna cavity theory. Then properties of some microstrip reconfigurable antennas are simulated using the finite-difference time-domain (FDTD) method. The results indicate that rectangle microstrip reconfigurable antennas can have good reconfigurability when the side lengths are greater than or equal to one operating wavelength.

**key words** reconfigurable antenna, microstrip antenna, cavity theory, finite-difference, time-domain method

## 1 引言

在各种军/民用雷达、无线通信系统中, 信息的出入依赖于天线。现代大容量、多功能、超宽带综合信息系统的迅猛发展, 使得同一平台上搭载的信息子系统数量增加, 天线数目也相应地增多。从降低综合信息系统的整体成本、减轻重量、减小平台雷达散射截面、实现良好的电磁兼容特性等方面来看, 这种现象非常有害, 也成为制约综合信息系统进一步向大容量、多功能、超宽带方向发展和应用的一大

“瓶颈”。

“可重构天线”的概念是针对这一难题提出的。它已经在传统意义上的两、三种传统天线结构简单融合的概念基础上发生了质的飞跃。它希望能在同一个通用天线口径中通过实时地改变口径的某些结构, 来获得所需要的天线特性, 从而达到“万能”(one does it all)的目的。目前极少有相关论文发表<sup>[1, 2]</sup>, 而我国目前还没有进行这方面的研究工作。基于这一现状, 首先采用微带天线作为可重构天线的载体, 对微带天线的可重构性进行了初步探讨。

## 2 微带可重构天线的基本原理

现代可重构天线技术的兴起依赖于现代微机电系统(MEMS)技术的发展,后者为其实现提供必不可少的超宽频带、可系统集成、低插损、高隔离度的MEMS开关。文献[3]指出MEMS开关的连通状态和断开状态在从直流到40GHz甚至更高的频率范围内分别提供小于1dB的插损和高于40dB的隔离度,并且具有高度的线性特性。将MEMS开关阵列与二维稠密辐射微元阵列按一定的拓扑结构连接,构成准“通用”天线口径,通过软硬件结合的方式调控开关阵列的通断组合,实时变换“通用”口径的电流分布,最终得到不同用途的天线辐射特性,这就是现代可重构天线的基本思想。

微带天线的辐射是由微带边缘、开路端或者槽缝等的场引起的。如果能够实时地改变微带天线口径中的微带边缘、开路端或者槽缝的形状和位置,就可以获得不同效果的天线特性。微带贴片天线如图1所示,现将顶部大贴片用图2所示均匀分布的小碎片阵代替。各阵元间用MEMS开关连接,通过专用控制电路(包括光控)来调控开关的通断。若某一

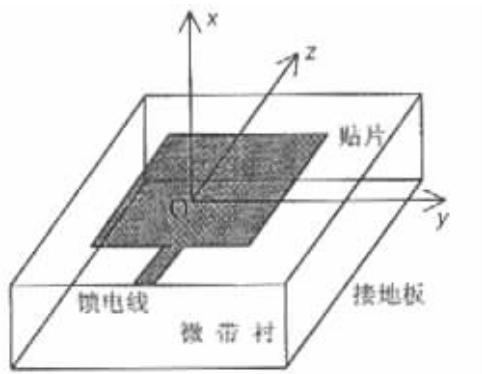


图1 微带天线结构和采用的坐标系

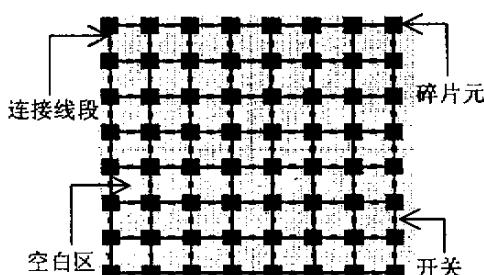


图2 微带可重构天线孔径表面碎片元阵

开关断开,原来天线表面的电流将被截断,相当于在天线上开了一缝隙,天线中的电磁能量可以从此开关断开处辐射出去。因此,使用开关阵可以使辐射器结构实时改变。不同的开关通断组合就代表不同的天线结构,也就对应着通用口径中不同的电流分布。通过对开关阵的实时控制,就可以获得天线的工作频率、方向图等的可重构特性。

微带可重构天线的工作机理也可以通过传统的微带天线腔模理论来解释,这更有利地理解它的特性。设有一矩形微带贴片天线,根据微带天线腔模理论,将天线视为一上下为电壁而四周为磁壁的谐振腔,如图3所示。由天线四周磁壁引入的等效电、磁流分别为:

$$\mathbf{J} = \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_t \quad (1)$$

$$\mathbf{M} = -\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}_t \quad (2)$$

这里 $\hat{\mathbf{n}}$ 表示天线四周壁法线方向,下标 $t$ 表示与法向垂直的切向分量。在天线贴片上引入一窄缝隙,平行于贴片的一条边,例如图3坐标系中的 $y$ 轴方向缝隙。这样,在窄缝隙面上就存在有切向电磁场,它的等效电磁流也可以由(1)(2)式表示。设微带天线地板相对于贴片很大,根据电磁场镜像理论,可以得到等效电磁流中只有等效磁流能够产生远区辐射场。假设天线工作时电场分布只沿垂直于缝隙长边方向(即图3中的 $Z$ 轴方向)有变化,这时只在与缝隙平行的微带两端存在有效的等效磁流辐射。由于微带两端等效磁流相平行,由磁流辐射特性可知,两端辐射在整个辐射空间中具有相同的极化特性。当引入如上所述的缝隙时,因为缝隙中的等效磁流与微带端等效磁流平行,所以辐射也具有相同的极化特性。两种辐射场在辐射空间中迭加,使得在某些方向上场能够相互加强,而在某些方向上相互削弱,因而表现出天线辐射方向图可重构的特性。类似地,对矩形微带贴片天线的另一组边,有相同的结

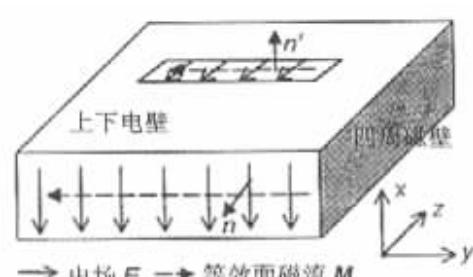


图3 微带天线的谐振腔模型

论。但是缝隙等效面磁流随缝隙位置的变化而变化,它与微带贴片四周的等效面电磁流相互影响,关系复杂,因此直接由这一理论计算天线的辐射特性有一定的困难,这也正是微带可重构天线严格解析分析的难点。

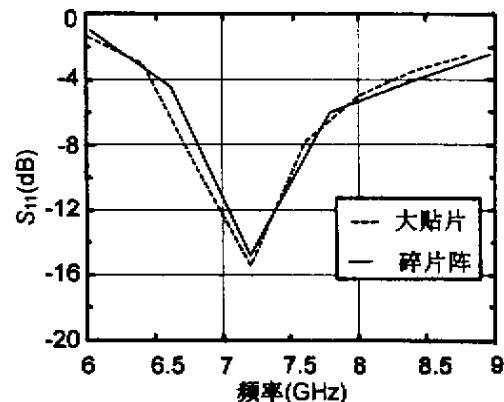
如前所述,由 MEMS 开关阵控制的微带碎片阵天线,通过某一位置的开关断开,就得到了一个缝隙。如果让多处开关断开,则相当于引入了一组等效磁流辐射。通过实时控制开关状态,就可以得到不同组合的磁流阵,有多处等效磁流同时能够被调整,天线的特性将存在可重构的可能性,天线的设计则转化为控制一磁流阵和微带边沿的辐射。可以看出它与普通的缝隙天线相比要复杂很多,与传统的阵列天线相比也有明显的区别。

### 3 数值仿真

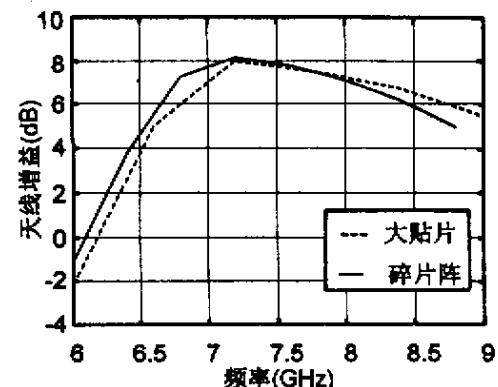
#### 3.1 实验模型的选择

先采用电磁场仿真软件 HFSS 对一大贴片微带天线在地板小孔耦合馈电方式情况下的天线特性进行了模拟,天线结构及其它参数与文献[4]相同。然后,对碎片元阵代替大贴片的微带天线在相同馈电情况下的天线特性进行了模拟。碎片元阵尺寸与大贴片相同。小碎片元的面积为  $0.775 \times 0.775\text{mm}^2$ ,连接细线段尺寸为  $0.3 \times 0.2\text{mm}^2$ 。碎片元中间小空白区面积约  $1.0 \times 1.0\text{mm}^2$ ,边长约为工作频率波长的  $1/25$ 。开关尺寸取  $0.4 \times 0.2\text{mm}^2$ ,与 MEMS 开关尺寸<sup>[3]</sup>相当,当开关连通时用同尺寸的一小金属片连通来模拟,当开关断开时去掉该金属片。图 4(a)是当开关全部闭合时微带碎片元阵与大贴片天线的  $S_{11}$  参数比较,图 4(b)是两天线增益特性的比较。从图中可以看出,两天线的特性是基本一致的,这说明当阵元间空白区适当小时,开关闭合区域内的子碎片元阵可以用连通一体的大金属贴片来代替。

由于模拟小贴片阵时,结构参数输入很复杂,且 HFSS 一次仿真周期过长,最后选用由本实验室开发的时域有限差分法(FDTD)通用电磁仿真软件进行仿真。大量的测试例子表明,该软件是精确可靠的。在仿真过程中,用相应位置的缝隙来代替开关的断开,并且使缝隙的宽度与上述实例中 MEMS 开关断开时所能获得的缝隙宽度基本一致,其余位置用大金属贴片代替。根据上述仿真实例以及 MEMS 开关优异的射频性能,可以得知,这种简化是合理的。



(a)  $S_{11}$  参数比较



(b) 增益特性比较

图 4 碎片阵列与大贴片天线的特性比较

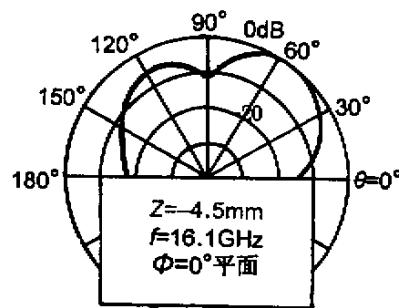
#### 3.2 数值实验

为了方便使用 FDTD 法仿真,选择微带馈电的微带天线作为研究对象,仿真时采用的天线结构和坐标系如图 1 所示,贴片的几何中心置于原点。其中微带衬底的相对介电常数  $\epsilon_r = 2.22$ ,厚度  $L_x = 0.794\text{mm}$ ,天线贴片在 Y 轴和 Z 轴方向的宽度分别为  $L_y = 12.448\text{mm}$ ,  $L_z = 16.0\text{mm}$ 。微带馈线宽度为  $w_f = 2.334\text{mm}$ ,其特性阻抗约为  $50\Omega$ 。在用 FDTD 法进行仿真时,选取空间步长为:  $\Delta X = 0.1588\text{mm}$ ,  $\Delta Y = 0.389\text{mm}$ ,  $\Delta Z = 0.4\text{mm}$ ,采用 Gedney 提出的完全匹配层(PML)<sup>[5]</sup>作为截断 FDTD 网格的吸收边界条件。天线地平面设为无限大,与仿真空间下边界相距 5 个 FDTD 网格,微带馈线设为无限长,在距贴片 30 个网格处被吸收边界截断,天线贴片在其它方向上相距吸收边界 10 个网格。仿真总网格数为  $20 \times 52 \times 80$ 。

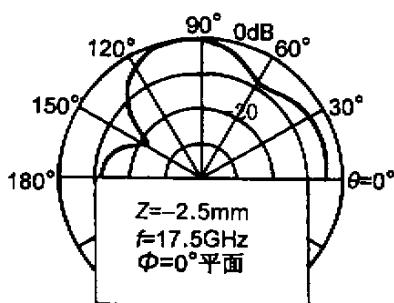
为了观察天线的宽频带特性,采用高斯脉冲作

为激励源,且让高斯脉冲源的最高频率分量为20GHz。选取的空间步长最大值 $\Delta z$ 约为最高频率分量在介质中波长的1/25,因此可以得知由网格引入的数值色散非常小。时间步长选择为0.46ps,以满足稳定性条件。激励源置于微带输入端与PML相距7个网格处。近远场变换的惠更斯面选择在PML向内第三格处的闭合面,但在微带馈电一侧选择在距PML向内第二十三个网格处,以使激励源位于惠更斯面外。仿真软件在刷新位于不同介质界面上的电场分量时,介电常数取为两介电常数的平均值。模拟的总时间步取为4000步,以便使仿真结束时仿真空间中的信号衰减到足够小。

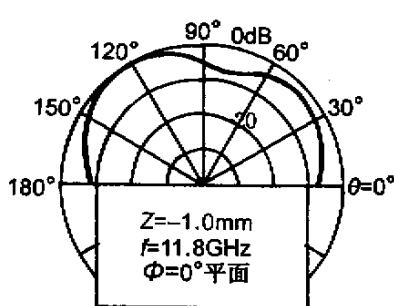
图5(a)(b)和(c)是将一矩形缝隙置于三种不



(a) 天线1方向图



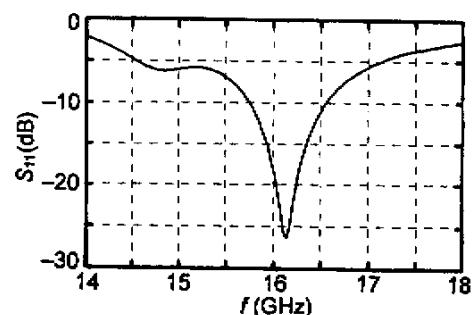
(b) 天线2方向图



(c) 天线3方向图

图5 缝隙位于不同位置的三种天线 $\phi = 0^\circ$ 平面方向图

同位置时所得到的在 $\phi = 0^\circ$ 平面( $XOZ$ 平面)内的方向图。缝隙的位置各图中已经说明,缝隙的面积为 $8 \times 0.8\text{mm}^2$ ,其长边垂直于 $Z$ 轴,且关于 $Z$ 轴对称。缝隙位置的改变,将使馈电端口的匹配特性发生改变。各方向图频率点选择在各自缝隙位置不同的条件下匹配效果最佳的频率点(要求回波损失小于-10dB),即馈电端口的 $S_{11}$ 参数最小值所对应的频率。图6给出了图5(a)情况下的 $S_{11}$ 参数,由图可见微带天线在该情况下匹配最佳位置在 $f_0 = 16.1\text{GHz}$ 附近,天线工作带宽约为10%。图7给出了图5(a)情况下的电场 $E_x$ 的场强分布图。



6 缝隙位于 $Z = -4.5\text{mm}$ 时天线 $S_{11}$ 参数随频率的变化

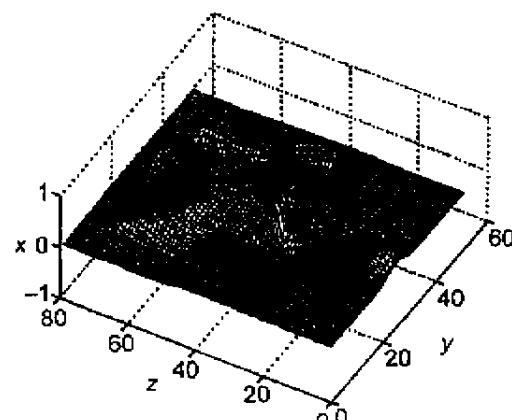


图7 图5(a)所示情况下电场 $E_x$ 截面分布图

在以上各例中,当缝隙位置沿 $Z$ 轴变化时, $\theta = 90^\circ$ 平面( $XOY$ 平面)内天线的方向图变化不太明显。如果让缝隙沿 $Z$ 轴方向放置,仿真表明在改变缝隙位置时,图5(c)所示频率点上微带天线的辐射方向图几乎没有改变,但图5(a)(b)所示的频率点上,方向图将被改变。此外,微带天线的最低阶模式,即一阶模式频率不能够实现重构特性。这些结

果不一一列出。关于两缝和多缝情况,本文暂且不作讨论。

## 4 分析

从图 5(a)、(b) 和(c) 可以看出该天线在  $\phi = 0^\circ$  面( $XOZ$  平面) 内能较好地进行方向图扫描, 而扫描特性是智能天线系统必须具有的特性。尽管这里要求改变工作频率, 但如果不考虑匹配问题, 而在某一特定频率下对方向图进行观察(例如  $f = 16.1\text{GHz}$ ), 可以发现, 以上三种情况同样可以获得较好方向图扫描特性。所以, 只要能够在同一频率点上使具有不同辐射方向图的天线结构匹配良好, 必将能够在相同的频率点上实时变换方向图。继而可以得知, 如果能够改变匹配的频率点, 在不同的频率点上实现方向图扫描的功能, 则天线就可以在很宽的频带范围内对方向图进行控制。

根据数值实验结果表明, 矩形微带贴片天线在  $E_{001}^x$  模式对应的频率范围没有足够能力重构辐射方向图。这是因为在一阶模式的情况下, 根据微带天线腔模理论, 可以得知, 当缝隙位置变化时微带端辐射与引入的缝隙等效磁流辐射在远区的相位关系变化较小。因此, 无论缝隙位于贴片上的任何位置, 两种辐射在全辐射空间中不能形成在某些方向上场分量相互加强而另外一些方向上场分量削弱的特性, 因而不具有重构天线辐射方向图的必要条件。可以肯定, 当天线工作在  $E_{010}^x$  模式时, 可以得到与  $E_{001}^x$  模式相同的结果。如果要求天线能够重构方向图, 天线的某一边长要大于或等于一个工作波长, 这样才能使缝隙辐射场与微带端辐射场在远区有  $0^\circ \sim 360^\circ$  范围内变化的相位差。图 5 所示的几种情况中, 工作频率都高于一阶模式对应的频率, 说明天线都工作在高阶模式上, 它们的边长满足大于或等于一个工作边长的条件。随着缝隙位置的改变, 缝隙引入的等效磁流辐射与微带端辐射在远区的相位差可以在较大的范围内变化。并且等效磁流的大小也随着缝隙位置的变化而改变, 这样就有可能在全辐射空间的某些方向上场分量相互加强而另外一些方向上场分量削弱, 表现出辐射方向图的重构特性。这就是上述仿真实验中微带天线能够实现方向图重构的本质原因。

仿真表明, 在图 5(c) 中所示的频率点上, 当缝隙沿  $Z$  方向时, 缝隙位置的改变并不使微带天线的

辐射方向图明显变化。分析表明, 在选定的频率点上微带天线贴片内的场分布为  $E_{00n}^x$  ( $n \geq 2$ ) 模式。实际上, 通过对图 5(c) 所示情况的垂直于  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  轴截面电场矢量图的观察, 很直观地得知天线的工作模式是准  $E_{002}^x$  模式。从图 7 可以看出, 在图 5(a) 的情况下, 天线的工作模式为  $E_{021}^x$  模式, 所以场在  $Y$  方向上也有变化, 因此当  $Z$  方向的缝隙位置改变时, 将影响天线辐射方向图, 符合仿真结果。

根据以上仿真结果和理论分析, 可以得到这样的结论: 当矩形微带贴片天线的某一边长大于等于一个工作波长时, 天线能够通过调整贴片上窄缝隙来实现辐射方向图重构, 而且平行于该边长的缝隙主要影响与该边长垂直方向的辐射特性。图 2 所示的碎片阵天线, 通过对开关阵的控制, 很容易实现缝隙位置的调整。可以预见, 通过开关阵调整  $Y$ 、 $Z$  两个方向的缝隙位置和数目, 微带天线将能够在全空间中实现良好的方向图扫描特性, 但其体积、重量以及复杂程度将比传统相控阵天线减小许多。

## 5 结论

本文对一种崭新的天线—可重构天线进行了初步探索。可重构天线是通过实时改变同一天线口径中的电流分布, 从而获得不同的天线特性。依据这一原理, 提出了一种微带可重构天线结构, 并合理地简化了数值实验模型。数值实验和分析表明, 矩形微带可重构天线当其一边长大于或等于一个工作波长时, 天线能够通过调整贴片上窄缝隙来实现天线特性的重构, 因此具有良好的应用前景。由于目前可重构天线的研究处于初步阶段, 还没有成熟的理论分析方法, 因此对可重构天线进行综合设计还必须进行大量的理论探讨和实验研究。这些工作将在以后的工作中进一步深入。

## 参考文献

- [1] J C Maloney, M P Kesler, L M Lust. Switched fragmented aperture antennas [C]. IEEE AP-S, 2000: 310~313.
- [2] C Bozler, R Drangmeister, S Duffy, J Knecht. MEMS microswitch arrays for reconfigurable distributed microwave components [C]. IEEE AP-S, 2000: 587~591.
- [3] H Izadpanah, B Warneke, R Loo, G. Tangonan. Reconfigurable low power, light weight wireless system based on the RF MEM switches [C]. IEEE MTT-S, 1999: 175~180.
- [4] J Xia. Analysis of one wide-band and high gain patch microstrip antenna using the (下转第 417 页)

## 6 结论

对DS/CDMA系统容量的提高,一方面要尽可能抑制系统的多址干扰,另一方面要尽量对各种期望信号分量进行充分利用。本文提出的2D-Rake接收机加上PPIC的DS/CDMA系统上行链路的接收结构,利用智能天线技术在空域对DOA不同于期望信号的干扰信号进行抑制,同时对期望信号的相关多径分量进行收集,利用Rake接收机对期望信号的不相关时延分量进行时间上的分集,然后再对多径合成结果进行部分并行干扰对消(PPIC),以对天线阵主瓣内的干扰信号进行进一步的抑制。由于采用了PPIC技术,一方面避免了因干扰分量太弱造成错误的干扰估计而恶化了系统的性能,另一方面大大减少了实际对消的干扰用户数,进一步减小了系统的缓存空间和运算量。联合的仿真实验表明无论是阵列接收,Rake合成还是PPIC均对总体的接收效果有明显的改善,它们的合理结合对DS/CDMA系统是一个比较完备而性能良好的接收方案。

## 参考文献

- [1] L C Godara. Applications of antenna arrays to mobile communications, part I: performance improvement, feasibility, and system considerations [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(7):1031~1060.
- [2] Guoqing Xue, Jianfeng Weng, et al.. Adaptive multi-satge parallel interference cancellation for CDMA [J]. IEEE JSAC, 1999, 17(10):1815~1827.

(上接第390页)

- FDTD method[J]. International Journal of RF & Microwave Computer-Aided Engineering, 1999, 9(6): 468~473.
- [5] S D Gedney. An anisotropic Perfectly matched Layer-absorbing medium for the truncation of FDTD lattices [J]. IEEE AP, 1996, 44(12): 1630~1639.



肖绍球 (1975-),男(土家族),湖南人,2000年在电子科技大学获硕士学位,现在电子科技大学应用物理研究所攻读博士学位,主要从事计算电磁学、天线理论与技术、微波毫米波集成电路等方面的研究。

- [3] T. Ojanpera, et al.. Qualitative comparison of some multiuser detector algorithms for wideband CDMA [C]. VTC98, Ottawa, Canada, May, 1998, 46~50.
- [4] Seungwon Choi, et al.. A novel adaptive beamforming algorithm for a smart antenna system in a CDMA mobile communication environment [J]. IEEE Trans. On Veh. Technol., 2000, 49(5):1793~1806.
- [5] Seungwon Choi, et al.. Design of an adaptive antenna array for tracking the source of maximum power and its application to CDMA mobile communications [J]. IEEE Trans. On Antenna and Propagation, 1997, 45(9):1393~1404.



张华 (1973-),男,河南人,博士生。分别于1995年、1998年从四川大学无线电系获得理科学士、硕士学位。现在主要从事智能天线技术及移动通信系统的研究。



龚耀寰 (1938-),男,四川人,教授,博士生导师。主要研究方向为自适应抗干扰技术、阵列信号处理技术及其在通信、雷达等电子系统中的应用。



王秉中 (1962-),男,四川人,电子科技大学应用物理研究所教授,博士生导师,所长。主要从事计算电磁学、电磁兼容、天线理论与技术和超高速集成电路互连封装等方面的研究。

## 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>