

非线性有源天线阵相位噪声的计算及测试

高伟亮 姜永华

(海军航空工程学院 401 教研室 烟台 264001)

摘 要:为了将非线性有源天线阵应用到高性能雷达和通信系统中,必须尽可能地降低非线性有源天线阵的相位噪声。首先介绍了非线性有源天线阵的拓扑结构及相位噪声模型;然后根据该模型详细推导了非线性有源天线阵相位噪声的计算公式,并对整个阵列的相位噪声进行了计算机仿真;最后搭建了 1×4 单元非线性有源天线阵实验系统并对其相位噪声进行了测试,测试结果与计算机仿真结果吻合;最终得出了非线性有源天线阵低相位噪声信号的产生方法。

关键词:非线性;有源天线阵;注频锁相;相位噪声

中图分类号: TP301 **文献标识码:** A

Calculating and testing of phase noise
in nonlinear active antenna array

Gao Weiliang Jiang Yonghua

(Naval Aeronautical and Astronautical University 401, NAAU, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to make the nonlinear active antenna array used on the high-powered radar and communications systems, the method to reduce the phase noise should be introduced as soon as possible. First, this paper introduces the topology structure and the phase noise model of nonlinear active antenna array, deduces the computing expressions of the phase noise in detail, and completes the computer simulation of the whole array's phase noise according to the model. Secondly, establishes the experiment system of 1×4 element injection-locking oscillators array and fulfills the testing of phase noise, and the result of computer simulation is consistent with the result of testing. At last, paper presents the generating method of low phase noise signal based on nonlinear active antenna array.

Keywords: nonlinear; active antenna array; injection-locking; phase noise

0 引言

非线性有源天线阵将多个固态振荡器组成一维或二维阵列,它可以不用移相器而是利用非线性动力学理论^[1],应用注频锁相技术和互注频锁相技术,同步有源天线阵中各振荡器单元,产生相干射频信号进而形成相对相移和天线阵面特定的相位分布从而实现天线阵波束扫描和波束形成, Meadows 将这种天线阵称为非线性有源天线阵^[2]。与传统的相控阵天线技术相比,它省去了体积庞大、结构复杂的移相网络和功率分配网络,将发射系统和天线系统进行一体化设计,具有很大的优越性。这种天线阵的最大优点是:低功耗、体积小、重量轻、成本低、容易实现数字化^[3-4]。

非线性有源天线阵发射波束形成系统要求各通道发射的相干信号,即频率严格一致,并有严格的相位关系,这

样信号才能在空间产生一定形状的波束。实际系统中由于相位噪声的影响破坏了各路发射信号间严格一致的相位关系,使天线阵波束指向不准、副瓣电平增加、主瓣变宽、波束畸变、零点指向不准。因此,要使用非线性有源天线阵实现波束扫描系统必须尽量降低阵列输出信号的相位噪声。低相位噪声信号产生技术是将非线性有源天线阵应用到高性能雷达和通信系统中所必需的。在军事上,将毫米波振荡源应用于雷达或通信系统中,通常要求在频率偏移为 10 kHz 条件下有优于 -100 dBc/Hz 的相位噪声^[5]。应用注频锁相振荡器阵列能够同步非线性有源天线阵中的各单元,从而实现毫米波的功率合成和多波束扫描。通常非线性有源天线阵的锁频带宽越宽系统工作越稳定,选择降低振荡器的品质因数 Q 可以提高系统锁频带宽,然而降低 Q 值的同时又会产生更大的相位噪声^[6-8]。因此,如何减小相位噪声具有极其重要的意义。

作者简介: 高伟亮,博士,主要研究方向为非线性有源天线阵、阵列信号处理、精确制导技术等。

1 非线性有源天线阵的拓扑结构及相位噪声模型

非线性有源天线阵的拓扑结构如图1所示。

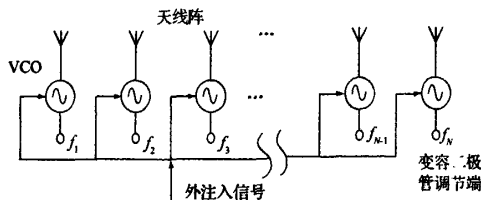


图1 非线性有源天线阵的拓扑结构

阵列中的每一个单元都是一个独立的且结构参数相同的压控振荡器，产生的发射信号可以直接馈给天线单元，或利用功率放大器放大后再供给天线单元。由于各振荡器单元的注入信号是由共同的馈电网络将同一信号功分得到的，并由注频锁相振荡器原理可知，若各振荡器的自由振荡频率与该信号频率的差小于锁频范围，那么各振荡器的输出信号频率相同，均为注入信号的频率。通过在锁频范围内调整各单元的自由振荡频率可实现阵元输出信号之间特定相位差，即相控阵波束扫描时所需的特定相位分布，替代了传统相控阵移相器的功能，从而实现波束在空间进行扫描^[9]。

若以一维线阵为例，非线性有源天线阵的等效噪声模型可以用图2表示。

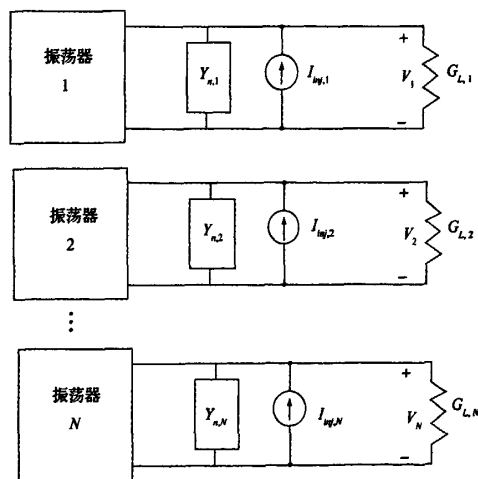


图2 非线性有源天线阵的相位噪声模型

其中，每组振荡器的外部噪声用等效噪声导纳 $Y_{n,i}$ 表示，注入信号用 $I_{inj,i}$ 表示。负载用 $G_{L,i}$ 表示。

2 相位噪声的计算

对于第 i 个振荡器，阵列的工作状态可描述为^[10]：

$$-\frac{1}{\omega_{3dB}} \cdot \frac{d\delta\varphi_i}{dt} = \rho_i (\delta\varphi_i - \delta\varphi_{inj}) \cos(\hat{\varphi}_i - \hat{\varphi}_{inj}) + B_n(t) \quad (1)$$

令 ω_c 为振荡器的自由振荡频率， Q 为振荡器的品质因数，则 $\omega_{3dB} \equiv \omega_c/2Q$ 。这里， ρ_i 表示注入强度， $\delta\varphi_i$ 和 $\delta\varphi_{inj}$ 分别表示振荡器和注入信号的微小相位波动参量。 $\hat{\varphi}_i, \hat{\varphi}_{inj}$ 表示阵列锁定后振荡器和注入信号的稳定状态参量。 $B_n(t)$ 为随时间变化的噪声电纳，代表噪声的相位扰动分量。对式(1)进行傅里叶变换并整理得：

$$-j \frac{\omega}{\omega_{3dB}} F(\delta\varphi_i) - \rho_i F(\delta\varphi_i) \cos(\hat{\varphi}_i - \hat{\varphi}_{inj}) = F(B_n) - \rho_i F(\delta\varphi_{inj}) \cos(\hat{\varphi}_i - \hat{\varphi}_{inj}) \quad (2)$$

这里用 $F(\cdot)$ 表示傅里叶变换， ω 代表频率偏移，则式(1)写成矩阵的形式为：

$$\bar{N} \cdot \bar{F}(\delta\varphi) = \bar{F}(B_n) - \bar{F}(\delta\varphi_{inj}) \bar{p} \quad (3)$$

$$\text{式中: } \bar{N} = \begin{bmatrix} N_1 & & \\ & N_2 & \\ & & \ddots \\ & & & N_N \end{bmatrix}_{N \times N}$$

$$N_i = -j \frac{\omega}{\omega_{3dB}} - \rho_i \cos(\hat{\varphi}_i - \hat{\varphi}_{inj});$$

$$\bar{F}(\delta\varphi) = \begin{bmatrix} F(\delta\varphi_1) \\ F(\delta\varphi_2) \\ \vdots \\ F(\delta\varphi_N) \end{bmatrix}, \quad \bar{F}(B_n) = \begin{bmatrix} F(B_{n1}) \\ F(B_{n2}) \\ \vdots \\ F(B_{nN}) \end{bmatrix},$$

$$\bar{p} = \begin{bmatrix} \rho_1 \cos(\hat{\varphi}_1 - \hat{\varphi}_{inj}) \\ \rho_2 \cos(\hat{\varphi}_2 - \hat{\varphi}_{inj}) \\ \vdots \\ \rho_N \cos(\hat{\varphi}_N - \hat{\varphi}_{inj}) \end{bmatrix}.$$

令 $\bar{P} = \bar{N}^{-1}$ ，可得：

$$\bar{F}(\delta\varphi) = \bar{P} \cdot \bar{F}(B_n) - \bar{F}(\delta\varphi_{inj}) \cdot \bar{P} \cdot \bar{p} \quad (4)$$

所以：

$$F(\delta\varphi_i) = p_i F(B_n) - F(\delta\varphi_{inj}) p_i \rho'_i \quad (5)$$

式中： p_i 是矩阵 \bar{P} 的一个单元。

我们更关心的是所有阵列单元合成输出信号的相位噪声。设阵列的输出信号为：

$$V(t) = A \sum_{j=1}^N \cos(\omega_0 t + \delta\varphi_j) \quad (6)$$

式中： ω_0 为阵列锁定的输出频率，用到较小的波动这一假设，可允许式(6)写成：

$$V(t) = NA \cos(\omega_0 t + \delta\varphi_{total}) \quad (7)$$

$$\text{于是: } \delta\varphi_{total} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \delta\varphi_j \quad (8)$$

$$\text{所以: } F(\delta\varphi_{total}) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N F(\delta\varphi_j) \quad (9)$$

再利用式(5)，则式(9)可整理成：

$$F(\delta\varphi_{total}) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p_j F(B_n) - \frac{F(\delta\varphi_{inj})}{N} \sum_{j=1}^N p_j \rho'_j \quad (10)$$

假定内部噪声源为正交噪声源并且有相同的功率谱,即:

$$\langle |F(B_{n1})|^2 \rangle = \langle |F(B_{n2})|^2 \rangle = \dots = \langle |F(B_{nN})|^2 \rangle = \langle |F(B_n)|^2 \rangle \quad (11)$$

则整个阵列的输出相位噪声为:

$$|F(\delta\varphi_{\text{total}})|^2 = \frac{|F(B_n)|^2}{N^2} \sum_{j=1}^N |p_j|^2 + \frac{|F(\delta\varphi_{\text{inj}})|^2}{N^2} \left| \sum_{j=1}^N p_j \rho_j' \right|^2 \quad (12)$$

若 $\rho_j = \rho, \varphi_j - \varphi_{\text{inj}} = 2n\pi$, 则可得:

$$p_j = \frac{-1}{\rho + j\omega/\omega_{3\text{dB}}} \quad (13)$$

再由振荡器自由振荡时的相位噪声:

$$|F(\delta\varphi)|_{\text{free}}^2 = \frac{|F(B_n)|^2}{(\omega/\omega_{3\text{dB}})^2} \quad (14)$$

可得:

$$|F(B_n)|^2 = |F(\delta\varphi)|_{\text{free}}^2 (\omega/\omega_{3\text{dB}})^2 \quad (15)$$

将式(13)和式(15)代入式(12)可得整个阵列的输出信号相位噪声为:

$$|F(\delta\varphi_{\text{total}})|^2 = \frac{1}{N} |F(\delta\varphi)|_{\text{free}}^2 \frac{(\omega/\omega_{3\text{dB}})^2}{\rho^2 + (\omega/\omega_{3\text{dB}})^2} + |F(\delta\varphi_{\text{inj}})|^2 \frac{\rho^2}{\rho^2 + (\omega/\omega_{3\text{dB}})^2} \quad (16)$$

式中: $|F(\delta\varphi)|_{\text{free}}^2$ 为单个振荡器自由振荡时的相位噪声, $|F(\delta\varphi_{\text{inj}})|^2$ 为注入信号的相位噪声。于是,可以得出如下结论:

(1)当频率偏移较小($\omega \rightarrow 0$)时,阵列的相位噪声主要由注入信号的相位噪声决定,即: $\lim_{\omega \rightarrow 0} |F(\delta\varphi_{\text{total}})|^2 = |F(\delta\varphi_{\text{inj}})|^2$ 。

(2)当频率偏移较大($\omega \rightarrow \infty$)时,阵列的相位噪声主要由振荡器自由振荡时的相位噪声决定,即 $\lim_{\omega \rightarrow \infty} |F(\delta\varphi_{\text{total}})|^2 = \frac{1}{N} |F(\delta\varphi)|_{\text{free}}^2$ 。

3 计算机仿真

仿真1:固定 $\rho = 0.02$, 改变阵列单元的数目 N , 得到阵列的相位噪声曲线图,如图3所示。

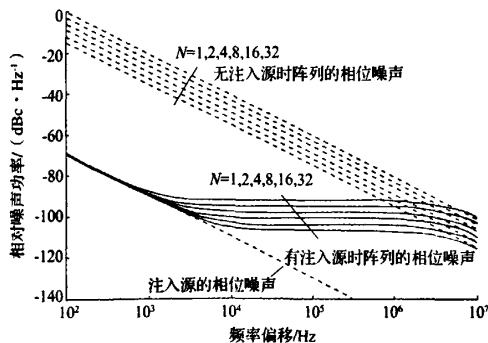


图3 阵列相位噪声曲线图(固定 $\rho = 0.02$)

由仿真可见,当频率偏移小于 10^3 Hz 时,阵列的相位噪声主要由注入源的相位噪声决定,并且不随着阵元数目的增加而变化,等于注入源的相位噪声。在频率偏移为 $10^3 \sim 10^6$ Hz 时,阵列的相位噪声功率基本维持不变,但相噪性能会随着阵元数目的增加而逐渐改善。当阵元数达到 10 个以上时,在频率偏移为 10 kHz 条件下有优于 -100 dBc/Hz 的相位噪声,可以满足高性能雷达和通信系统的军事要求,当 N 继续增加时相位噪声还会继续减小,但变化已不明显,当 $N \rightarrow \infty$ 时,相位噪声接近于注入源的相位噪声。此外,还可以发现,当无注入源时,整个阵列的相噪性能会迅速恶化,但也会随阵元数目的增加而有所改善。

仿真2:固定阵元数 $N = 10$, 改变阵列的注入强度 ρ , 得到阵列的相位噪声曲线图,如图4所示。

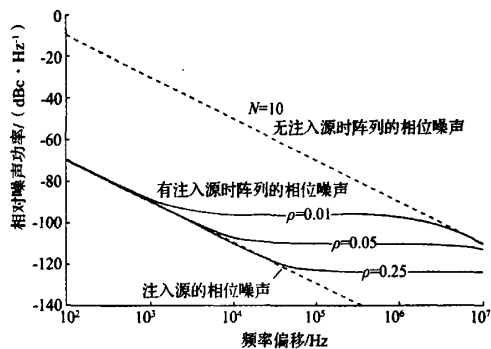


图4 阵列相位噪声曲线图(固定 $N = 10$)

由仿真可见,当固定阵元 $N = 10$ 时,阵列的相位噪声性能会随着注入强度的增加而明显改善。当注入强度 $\rho > 0.01$ 时,在频率偏移为 10 kHz 条件下有优于 -100 dBc/Hz 的相位噪声,此时可以满足高性能雷达和通信系统的军事要求,当注入强度 ρ 继续增加时,相位噪声接近于注入源的相位噪声。图4中在频率偏移为 10 kHz 条件下,相位噪声约为 -115 dBc/Hz。

4 相位噪声的测试

应用微波集成振荡器 PM2503 搭建的 1×4 单元非线性有源天线阵的实物照片如图5所示。

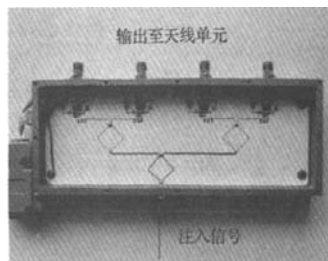


图5 1×4 单元非线性有源天线阵实物图

(1) 振荡器自由振荡时的相位噪声

由于每个微波振荡器都是采用同一集成芯片 PM2503 实现,因此它们自由振荡时的相位噪声基本相当。对阵列首单元加入 12.07 V 调谐电压时,自由振荡频率分别为 2.519 GHz 用 Agilent 公司的频谱仪 E4407B 测得的相位噪声如图 6 所示,在频率偏移 10 kHz 时,相噪为 -55.89 dBc/Hz 可见,振荡器自由振荡时相位噪声较差。

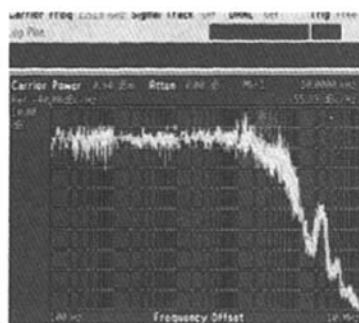


图6 自由振荡时的相位噪声

(2) 注入源的相位噪声

我们采用 Agilent 公司的 E8257C 标准信号源输出 2.5 GHz 的信号,用频谱仪测得注入源的相位噪声如图 7 所示,在频率偏移 10 kHz 时,相位噪声为 -100.65 dBc/Hz。

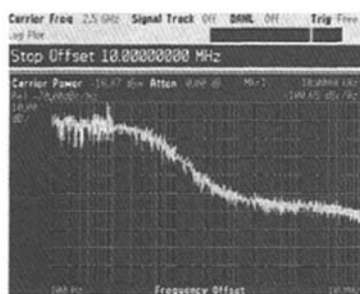


图7 注入源的相位噪声

(3) 注频锁定后振荡器的相位噪声

用标准信号源输出 0 dBm、2.5 GHz 的信号,调整注频锁相振荡器阵列各单元的自由振荡频率,使其 4 个单元发生稳定的注频锁相现象,测得每个单元的输出频率均为 2.5 GHz。首单元的相位噪声如图 8 所示。在频率偏移 10 kHz 时,相位噪声为 -91.80 dBc/Hz。可见,注频锁定后振荡器输出信号的相位噪声性能要大大好于振荡器自由振荡时的相位噪声性能,比注入源的相位噪声性能略差。

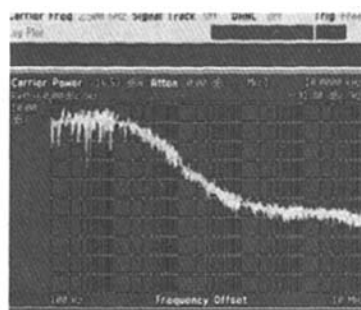


图8 注频锁定后振荡器的相位噪声

(4) 整个阵列的相位噪声

整个阵列的输出经过 1×4 单元微带贴片天线发射至空间,再由微带贴片天线接收输入至频谱仪,可测得整个阵列的相位噪声如图 9 所示。在频率偏移 10 kHz 时,相位噪声为 -86.72 dBc/Hz,由此可见,整个阵列输出信号的相位噪声性能要远远好于振荡器自由振荡时的相噪性能,和注频锁定后振荡器的相位噪声性能接近,但比注入源的相位噪声性能差。

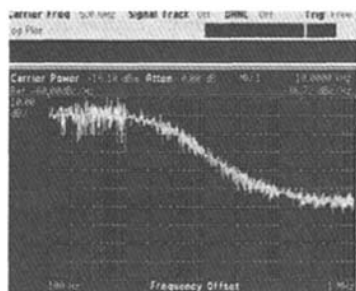


图9 整个阵列的输出相位噪声

通过实验我们还发现:(1)整个阵列采用 4 个阵元输出时,相位噪声性能要优于只采用 1 个、2 个、3 个阵元的情形;(2)加大注入信号的功率至 5 dBm,再增加至 10 dBm。在频率偏移 10 kHz 时,相位噪声分别为 -91.29 dBc/Hz 和 -96.12 dBc/Hz。若进一步增加注入源的功率,相位噪声性能接近 -97 dBc/Hz。可见,提高注入源的功率,可改善信号的相位噪声性能,并且随着注入源功率的增加,相位噪声性能有一最佳值。

5 结束语

相位噪声的测试结果与计算机仿真结果吻合。因此,最终得出非线性有源天线阵降低相位噪声信号产生方法为:(1)采用高稳定度低相位噪声信号作为注入源,利用现代高稳定度低相位噪声信号产生技术完全可以产生这一高性能的基准信号;(2)适当增加天线阵阵元的数目,通常要求 $N > 10$;(3)适当加大注入信号的功率,通常要求 $\rho > 0.01$ 。

(下转第 41 页)

测试时间的延长是其中两个方面。要弥补测试设备存储容量的不足和减少测试时间,采用对测试向量进行压缩解压缩的方法是一种比较切实可行的方法。本文提出了一种有效的编码方案,能有效地压缩测试数据存储量以及减少测试应用时间。这一方案仅仅依据一个预先计算出的测试集,编码其中的连续与交替变化位的长度,并且在芯片上嵌入一个有限状态机作为解码器,独立于被测试电路,与同类型的编码方案相比较,这一方案不仅具有更高的压缩率,而且更广泛地适应于不同的编码对象,尤其对测试数据流中含有变化较多的数据位,更能够体现出其优越性。

参考文献

- [1] JAS A, GHOSH-DASTIDAR J, TOUBA N. A scan vector compression/decompression using statistical coding[C]. Proceedings of the 17th IEEE VLSI Test Symposium, Dana Point, California, 1999; 114-120.
- [2] JAS A, GHOSH-DASTIDAR J, NG M E, et al. An efficient test vector compression scheme using selective Huffman coding[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2003, 22(6): 797-806.
- [3] CHANDRA A, CHAKRABARTY K. System-on-a-chiptest-data compression and decompression architectures based on golomb codes[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided-Design, 2001, 20(3): 355-368.
- [4] CHANDRA A, CHAKRABARTY K. Frequency-directed run-length (FDR) codes with application to system-on-a-chip test data compression[C]. Proceedings of the 20th IEEE VLSI Test Symposium, Marina Del Rey, California, 2001; 42-47.
- [5] 韩银和, 李晓维, 徐勇军, 等. 应用 Variable-Tail 编码压缩的测试资源划分方法[J]. 电子学报, 2004, 32(8): 1346-1350.
- [6] CHANDRA A, CHAKRABARTY K. Reduction of SOC test data volume, scan power and testing time using alternating run-length codes[C]. Proceedings of IEEE/ACM, Design Automation Conference, New Orleans, Louisiana, 2002; 673-678.
- [7] LI L, CHAKRABARTY K. Test compression using dictionaries with fixed-length indices[C]. Proceedings of the 21st IEEE VLSI Test Symposium, Napa Valley, California, 2003; 219-224.
- [8] SUN X, KINNEY L, VINNAKOTA B. Combining dictionary coding and LFSR reseeding for test data compression[C]. Proceedings of the 42nd Design Automation Conference, San Diego, California, 2004; 944-947.

(上接第 37 页)

参考文献

- [1] 唐志凯, 刘隆和, 陶勇刚. 有源天线阵波束电扫描新技术[J]. 微波学报, 2005, 21(4): 44-46.
- [2] MEADOWS B K, HEATH T H, NEEFF J D. Non-linear antenna technology[J]. Proc. IEEE, 2002, 90(5): 882-896.
- [3] STEPHAN K D. Inter-injection locked oscillators for power combining using mutually synchronized oscillator arrays[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1986, 34(10): 1017-1025.
- [4] YORK R A, ITOH T. Injection-locking and phase-locked techniques for beam control[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1998, 46(11): 1920-1929.
- [5] CHANG H C, CAO X, VAUGHAN M J, et al. Phase noise in externally injection-locked oscillator arrays[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 1997, 45(9): 2035-2042.
- [6] POGORZELSKI R J. Phased arrays based on oscillators coupled on triangular and hexagonal lattices[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2004, 52(3): 790-800.
- [7] HEATH T. Simultaneous beam steering and null formation with coupled, nonlinear oscillator arrays[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2005, 53(6): 2031-2035.
- [8] GEORGIADIS A, COLLADO A, SUAREZ A. New techniques for the analysis and design of coupled-oscillators systems[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(11): 3864-3877.
- [9] 唐志凯, 刘隆和, 姜永华. 基于注频锁相技术的发射波束形成系统[J]. 微波学报, 2007, 23(2): 19-24.
- [10] 唐志凯. 非线性有源天线阵技术研究[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2005.

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，一直致力和专注于微波、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>