

doi: 10.13682/j.issn.2095-6533.2014.05.019

基于 RWG 矩量法的短波天线辐射性能分析

陈斌¹, 赵鹏¹, 杨路刚¹, 颜慧²

(1. 海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033; 2. 解放军 91917 部队, 北京 102100)

摘要: RWG 矩量法在短波天线和地面全剖分时数据量过大且地面效应不足, 针对由此引起的计算准确度偏低问题, 提出一种新的计算模型。新模型引入辅助三角形对短波接地天线馈源模型进行改进, 以理想导电半空间场型并矢格林函数作为电场积分方程的积分内核, RWG 边元仅剖分天线辐射体。采用矩量法离散电场积分方程, 分析阻抗矩阵计算中的奇异积分和高震荡性问题, 引入 9 点积分法予以解决。以短波鞭状天线为例, 进行场强方向图和输入阻抗的仿真, 结果与商用电磁仿真软件 FEKO 以及公开的文献吻合较好。新模型可减小计算量和仿真时间, 提高计算准确度。

关键词: 矩量法; 阻抗矩阵; 并矢格林函数; 短波天线; 辐射性能

中图分类号: TN82

文献标识码: A

文章编号: 2095-6533(2014)05-0096-05

Analysis of shortwave antenna radiation performance based on RWG-MoM

CHEN Bin¹, ZHAO Peng¹, YANG Lugang¹, YAN Hui²

(1. School of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;
2. Unit 91917 of PLA, Beijing 102100, China)

Abstract: There would be too much data and little ground effect to calculate the radiation field correctly when shortwave antenna and ground are all meshed by RWG-MoM. Therefore a new calculation model is proposed in this paper. In this model, some auxiliary triangles are introduced to improve the feed source model, only the antenna radiator is meshed by RWG (RAO-Wilton-Glisson, RWG) edge elements, and the electric field's dyadic Green's function integral solution is obtained on perfectly electric conducting flat. The Method of Moment (MoM) is adapted to discrete the Electric Field Integral Equation (EFIE). The singular integral and highly ringing in impedance matrix calculating are analysed and solved by Nine Points Integral Method. Using shortwave whip antenna as example, the field pattern and input impedance are simulated and calculated. Results are in good agreement with the ones calculated by commercial electromagnetic simulation software FEKO and published papers. This new model could reduce the quantity of data and formulated time and increase the calculation accuracy.

Keywords: method of moment, impedance matrix, dyadic Green's function, shortwave antenna, radiation performance

天线的辐射性能直接影响无线电通信系统的整体性能。天线辐射性能分析本质上是满足一定边界条件的电磁场数值计算问题。矩量法^[1]主要用

于求解电磁场积分方程, 利用基函数近似展开未知函数, 代入算子方程, 在权函数的加权平均下使方程的余量为零。矩量法的研究主要围绕基函数和

收稿日期: 2014-05-19

作者简介: 陈斌(1975—), 男, 硕士, 副教授, 从事数字通信研究。E-mail: chenbin197501@126.com

赵鹏(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为数字通信。E-mail: feixiangzhaopeng@163.com

权函数的选取方法、如何处理奇异点、积分方程和离散矩阵之间的关系以及矩阵方程的快算求解算法四个方面展开。

文献[2]利用三角形边元(Triangular Edge Element)共形任意形状散射体曲面,提出 RWG(RAO-Wilton-Glisson)矢量基函数,系统地论述了 RWG 矩量法中子域基函数的建立和电场积分方程的解析;文献[3]论述了数值积分的二维和三维解,为连续积分的数值计算提供途径;文献[4]将边馈电模型引入天线网格结构,用 δ 函数表示馈电缝隙中的电场,在分析地面上天线时存在数据量过大且地面效应不足的问题;文献[5]在 RWG 矩量法分析金属球表面天线时引入极限的思想设置共形面结合处的馈源;文献[6-7]利用指数谱函数研究了地面电磁散射特性的参数反演问题。

本文基于以上研究成果,重点分析文献[4]给出的地面上天线模型的不足,引入辅助三角形和理想导电半空间并矢格林函数,提出一种新的计算模型。针对阻抗矩阵计算中的奇异积分和高震荡性问题,采用 9 点积分法进行计算。以短波鞭状天线为例,进行场强方向图和输入阻抗的计算,与 FEKO 仿真结果进行对比,以验证算法的正确性和有效性。

1 积分方程和 RWG 矩量法

1.1 电场积分方程

实际短波鞭状天线架设时会铺设地网,地面可用无限大理想导电平面来近似处理,与其上层空气构成理想导电半空间。由镜像原理可知,理想导电半空间并矢格林函数是原电流源并矢格林函数及其镜像的叠加^[8]

$$\mathbf{G}_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \left(I - \frac{\nabla \nabla'}{k^2} \right) [G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') - G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}'_i)] + 2\mathbf{e}_z \mathbf{e}_z G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}'_i), \quad (1)$$

其中 $G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 和 $G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}'_i)$ 分别表示自由空间以及镜像标量格林函数, \mathbf{e}_z 为 z 轴单位矢量。

根据导体表面边界条件可得到理想导电半空间中电场积分方程

$$\mathbf{E}^i(\mathbf{r})|_t = j\omega u \int_S \mathbf{G}_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}(\mathbf{r}') dS' |_t, \quad (2)$$

其中 $\mathbf{E}^i(\mathbf{r})$ 表示馈源激发的电场, $\mathbf{G}_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 是理想导电半空间并矢格林函数, $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$ 表示天线表面电流分布, $j\omega u \int_S \mathbf{G}_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}(\mathbf{r}') dS'$ 是天线辐射电场的并

矢格林函数积分解, u 和 ω 分别表示磁导率和工作角频率, $|_t$ 表示切向分量。

对 $\mathbf{G}_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 作本征展开, 文献[8]中引入 \mathbf{L} , \mathbf{M} 和 \mathbf{N} 三类矢量波函数, 采用欧姆-瑞利方法求解, 限于篇幅, 这里不再进行推导。

1.2 RWG 矩量法

基函数和权函数用于拟合未知函数, 拟合误差越小, 计算精度越高, 收敛越快。RWG 矩量法将散射体表面具有公共边的一对三角形定义为 RWG 边元, 定义边元域上矢量基函数^[2]

$$\mathbf{f}(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{l}{2A^+} \mathbf{p}^+(\mathbf{r}), & \mathbf{r} \in T^+, \\ \frac{l}{2A^-} \mathbf{p}^-(\mathbf{r}), & \mathbf{r} \in T^-, \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (3)$$

其中 T^\pm 是 RWG 边元的一对三角形, 其中心为 \mathbf{r}^\pm , l 是其公共边长度, \mathbf{r} 是两三角形中任一点, $\mathbf{p}^+(\mathbf{r})$ 是由 T^+ 的自由顶点指向 \mathbf{r} 的矢量, $\mathbf{p}^-(\mathbf{r})$ 是由 \mathbf{r} 指向 T^- 的自由顶点的矢量。

以 RWG 矢量基函数展开表面电流分布 \mathbf{J} , 可得

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}) = \sum_{n=1}^N I_n \mathbf{f}_n(\mathbf{r}), \quad (4)$$

其中 N 是 RWG 边元的个数, I_n 是扩展系数。将式(1)和式(4)代入式(2), 采用伽辽金法^[9], 可得

$$\int_{\Delta_m} \mathbf{E}^i(\mathbf{r}) \mathbf{f}_m(\mathbf{r}) dS = j\omega u \sum_{n=1}^N I_n \int_{\Delta_m} \mathbf{f}_m(\mathbf{r}) \int_{\Delta_n} \mathbf{G}_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{f}_n(\mathbf{r}') dS' dS, \quad (5)$$

其中 Δ 表示边元三角形面。将式(5)写成矩阵形式, 可得系统矩量方程

$$[\mathbf{z}_{mn}] [\mathbf{I}_n] = [\mathbf{v}_m], \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{z}_{mn} = j\omega u \int_{\Delta_m} \mathbf{f}_m(\mathbf{r}) \int_{\Delta_n} \mathbf{G}_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{f}_n(\mathbf{r}') dS' dS, \quad (7)$$

$$\mathbf{v}_m = \int_{\Delta_m} \mathbf{E}^i(\mathbf{r}) \mathbf{f}_m(\mathbf{r}) dS. \quad (8)$$

解矩量方程可得扩展系数矢量 $[\mathbf{I}_n]$ 。RWG 矩量法将边元的电流分布等效为无穷小偶极子, 所有无穷小偶极子辐射场的叠加可得到总辐射场。偶极子矩量由表面电流在三角形面上积分解得

$$\mathbf{m} = \int_{\Delta_n} I_n \mathbf{f}_n(\mathbf{r}) dS = l_n I_n (\mathbf{r}_n^- - \mathbf{r}_n^+). \quad (9)$$

无穷小偶极子辐射场的计算可由文献[10]得到, 这里不再给出。

2 模型的改进

对于馈电源,用一个 RWG 边元的公共边做驱动边,模拟馈电缝隙内的电场^[11],缝隙两端跨接馈电电压 V ,当缝隙间距趋于无穷小时,其电场可用 δ 函数表示,即所谓 δ 函数函数发生器法^[4],该边元作为馈电边元,其激励电压为 V ,矩量可计算为

$$\mathbf{m} = \int_{\Delta_n} \delta(z) \mathbf{e}_z f(\mathbf{r}) dS = 1_n V. \quad (10)$$

文献[4]中以 RWG 边元剖分整个天线辐射体和地面,利用自由空间标量格林函数和位函数方程计算天线辐射场,该模型存在两个方面的缺陷:由于地面尺寸有限,地面效应不足,模型对鞭状天线的仿真是不准确的;当地面尺寸增加时,RWG 边元数目迅速增大,运算量急剧上升,对计算机的处理速度提出更高要求。以 10 m 单鞭天线为例,在频率为 27 MHz 情况下,取边元尺寸为 $\lambda/10$ (λ 表示波长),边元数目随地面(以平面正方形表示)尺寸变化的曲线如图 1 所示。

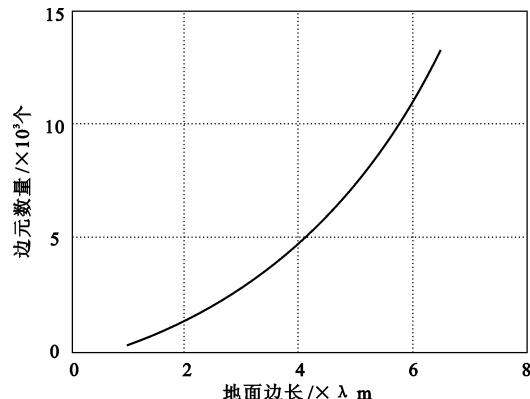


图 1 地面尺寸与边元数量关系

图 1 表明,地面尺寸增加时边元数量迅速增加,地面尺寸为 5λ m \times 5λ m 时,边元数量达到 8 965 个,阻抗矩阵是 8 965 阶方阵,边元利用率即天线辐射体边元数与地面边元数之比仅 3.6×10^{-3} ,当地面尺寸增加到 10λ m \times 10λ m 时,边元数量大于 1.5×10^4 ,对应阶数超过 2.25×10^8 阶的方阵,计算量过大,此时边元利用率几乎为 0。对于鞭天线网格结构,仅仅采用镜像法处理会使馈电边元和辐射体其他边元阻抗关系发生变化。针对以上问题,引进辅助三角形来改进馈源模型,只剖分天线辐射体,通过理想导电半空间并矢格林函数计算天线辐射场。在馈电缝隙处增加一对水平方向的辅助三

角形,以构造驱动边元,如图 2 所示。

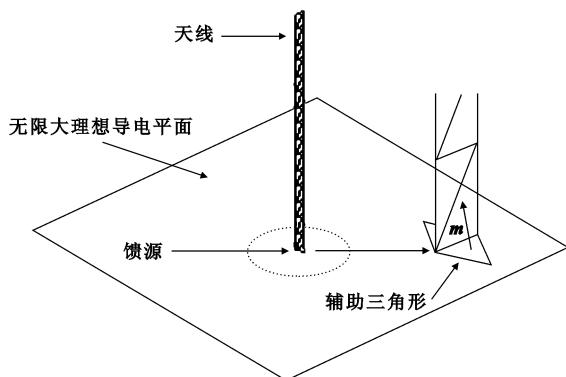


图 2 天线结构

该模型(以下称改进模型)使用带状结构^[12]等效理想导线构成天线辐射体,其底部与平面的交线使 2 个辅助三角形和对应的带上三角形构成 RWG 边元,该边元作为馈电边元,保证馈电边元和辐射体边元阻抗关系不变。整个网格结构边元数下降到 32 个,比原模型下降近 99%(地面尺寸不小于 3λ m \times 3λ m),但仿真性能有较大提高,采用文献[4]所给模型进行仿真,分别取地面尺寸为 2λ m \times 2λ m(对应图 3 中文献[4]模型 1)和 5λ m \times 5λ m(对应图 3 中文献[4]模型 2),与改进模型仿真结果的对比如图 3 和表 1 所示。

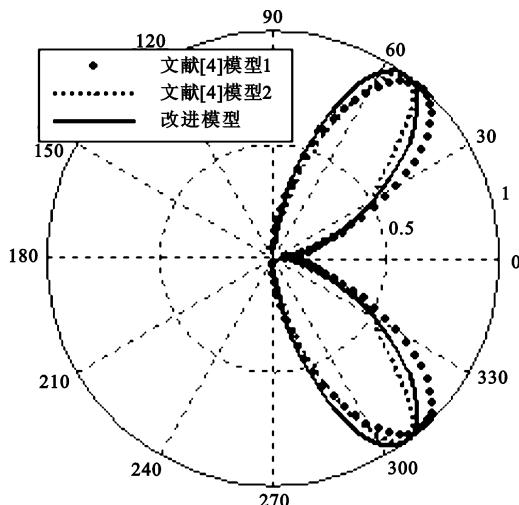


图 3 场强方向图的对比

图 3 示出了改进模型与文献[4]模型的场强方向图对比,两者在主瓣仰角上存在差异较大,反映了文献[4]模型地面效应不足的问题,表 1 说明,改进模型与 FEKO 模型基本吻合,准确度较高,而文献[4]模型仿真得到的主瓣仰角和半功率波束宽度(Half-Power Beam Width, HPBW)与改进模型有较大差异,误差较大,边元数量和运算时间远远超

过改进模型。所以,改进模型比文献[4]模型在仿真性能上有较大提升。

表 1 仿真性能对比

模型	主瓣仰角 / $^{\circ}$	HPBW / $^{\circ}$	边元数量 /个	计算时间 /s
文献[4]模型 1	52	32	1 867	43.079
文献[4]模型 2	48	24	8 965	501.825
改进模型	46	30	32	0.093
FEKO 模型	46	30	13	0.063

注意到馈电边元等效偶极子矩量 \mathbf{m} 沿表面切向的分量对辐射场没有贡献, 馈电边元矩量应修正为

$$\mathbf{m}_{(i,j)} = [l_{(i,j)} I_{(i,j)} [\mathbf{r}_{(i,j)}^c - \mathbf{r}_{(i,j)}^e] e_z] e_z, \quad (11)$$

其中 i, j 指馈电边元编号。

3 奇异性分析

通过方程(7)计算阻抗矩阵, 当边元 m 和 n 距离较远时, 被积函数在边元域上是连续函数, 可用高斯积分来计算。被积函数的奇异点出现在源点和场点重合的情况下, 此时, 方程(7)可计算为

$$z_{mn} = \left[\rho_n^+ \int_{\Delta_m} f_m(\mathbf{r}) G_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}_n^+) dS + \rho_n^- \int_{\Delta_m} f_m(\mathbf{r}) G_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}_n^-) dS \right] \frac{j\omega u l_n}{2}. \quad (12)$$

在满足计算精度要求的条件下, 引入 9 点积分法^[13], 式(12)中的积分项可计算为

$$\int_{T_n} \mathbf{G}_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}') f_n(\mathbf{r}') dS' = \frac{S_{T_n}}{9} \sum_{k=1}^9 \mathbf{G}_e(\mathbf{r}, \mathbf{r}_k^c) f_n(\mathbf{r}_k^c), \quad (13)$$

其中 S_{T_n} 表示边元正或负三角形面积。子三角形中心不可能与原三角形中心重合, 该方法避免了积分奇异点的出现。文献[14]按照三角形面元进行循环来计算的阻抗矩阵, 可提高填充效率。

4 天线辐射性能分析

以 10 m 鞭天线为例, 振子半径 0.005 m, 工作频率 27 MHz, 仿真得垂直面(方位角 $\varphi = 0^{\circ}$)场强方向图, 如图 4 和图 5 所示。

从图 4 可以看出, 方向图主瓣在天顶角 $\theta = 44^{\circ}$ 方向上, 半功率波束宽度为 30° , 与文献[15]基本吻合。输入阻抗仿真结果如图 6 所示。

图 6 表明, 对改进模型仿真得到的输入阻抗和 FEKO 仿真结果吻合较好, 达到计算精度的要求, 提高了边元利用率并减小了计算时间。

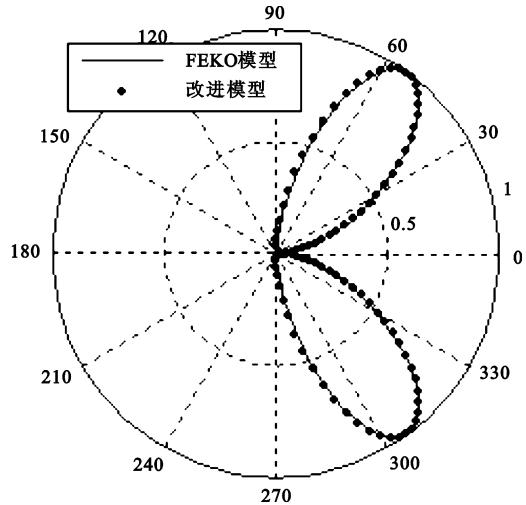


图 4 改进模型和 FEKO 仿真对比

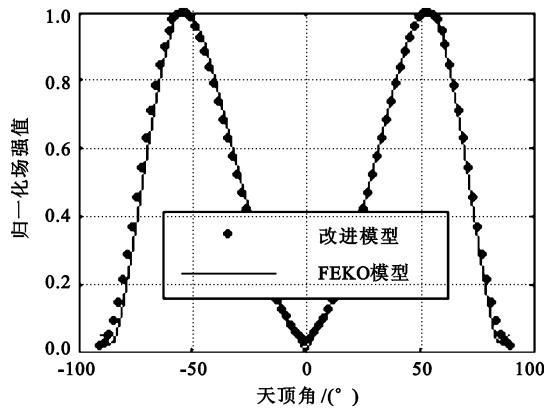


图 5 直角坐标系下仿真对比

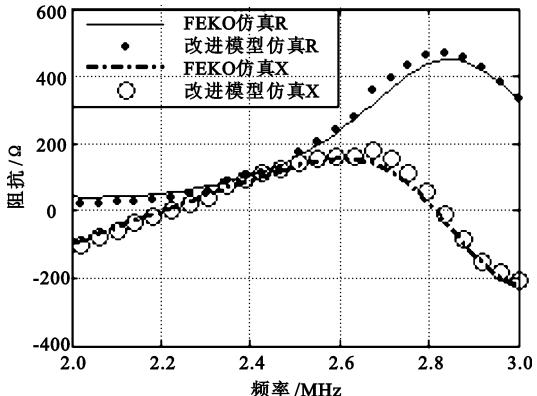


图 6 输入阻抗仿真结果比较

5 结语

针对以自由空间标量格林函数为积分内核的 RWG 矩量法在求解地面上天线辐射场问题时出现的数据量过大且准确度较低的问题, 提出采用辅助三角形改进馈源模型, 通过以场型并矢格林函数为

积分内核的电场积分方程计算辐射场。对于阻抗矩阵求解中出现的奇异积分,采用9点积分法进行计算。通过计算短波鞭状天线场强方向图和输入阻抗,与FEKO仿真结果作对比,结果表明该方法能够有效减小计算量并提高准确度,从而验证了算法的正确性和有效性。本文采用的处理方法,可应用于双极天线、共形天线等处理的场合。对于并矢格林函数分析分层介质中天线辐射问题将是下一步研究的重点。

参 考 文 献

- [1] Harrington R F. Field Computation by Moment Methods[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 1993.
- [2] Rao S M, Wilton D R, Glisson A W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, 30(3):409-418.
- [3] Savage J S, Peterson A F. Quadrature Rules for Numerical Integration over Triangles and Tetrahedra[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1996, 38(3):100-102.
- [4] Sergey N M. Antenna and EM modeling with MATLAB[M]. New York: Wiley Blackwell, 2002: 32-40.
- [5] 于涛,尹成友,刘海义.基于RWG-MoM金属球表面天

线的全波分析[J].微波学报,2012,28(1):23-28.

- [6] 杨超,靳伟.基于电磁散射特性的地面特征参数反演[J].西安邮电大学学报,2013,18(4):55-58.
- [7] 靳伟,杨超.一种新颖的多频带超材料的仿真研究[J].西安邮电大学学报,2013,18(2):97-100.
- [8] 戴振铎,鲁述.电磁理论中的并矢格林函数[M].武汉:武汉大学出版社,2005:65-67.
- [9] 王长清.现代计算电磁学基础[M].北京:北京大学出版社,2005:153-157.
- [10] Balanis C A. Antenna theory: analysis and design [M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1997:342-401.
- [11] 张青,宗鹏.基于RWG法分析考虑互偶的阵列方向特性[J].现代雷达,2010,32(6):73-76.
- [12] 王生水,毛钧杰,姜永金,等.利用时域电场积分方程分析天线辐射问题[J].电波科学学报,2007,22(5):837-841.
- [13] 胡怀宏,孙玉发.一种快速计算阻抗矩阵的有效方法[J].合肥工业大学学报,2011,34(4):617-619.
- [14] 韩国栋.矩量法中阻抗矩阵的优化填充技术[J].微波学报,2010(S1):15-19.
- [15] Warren L S, Gary A T. Antenna theory and design [M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1998:60-80.

〔责任编辑:王辉〕

(上接第90页)

参 考 文 献

- [1] 易予生,刘昕,刘楠,等. SAR回波数据并行化模拟研究[J].系统仿真学报,2008,20(4): 1064-1067.
- [2] 黄立胜,王贞松,郑天垚.基于FFT的快速SAR分布目标回波模拟算法[J].遥感学报,2004,8(2): 128-135.
- [3] 何峰,梁甸农,刘建平.星载双基地SAR空间几何关系和信号模型[J].系统工程与电子技术,2004,26(10): 1328-1331.
- [4] 张志勇,曹治国,张天序.一种SAR原始回波数据模拟方法[J].信号处理,1999,15(增刊):77-79.
- [5] 宋曦,周荫清,陈杰,等.一种星载SAR模糊区回波信号仿真方法[J].北京航空航天大学学报,2008,34(2): 144-147.

- [6] 韦立登,李绍恩,吴一戎,等. SAR原始回波信号生成算法的性能比较研究[J].电子与信息学报,2005,27(2): 262-265.
- [7] 汪丙南,张帆,向茂生.基于混合域的SAR回波快速算法[J].电子信息学报,2011,33(3): 690-695.
- [8] 刁桂杰,许小剑.大斜视SAR原始数据的快速模拟算法研究[J].电子信息学报,2011,33(3): 685-689.
- [9] 张居凤,冯德军,王雪松,等.雷达目标动态RCS仿真研究[J].系统仿真学报,2005,17(4): 834-837.
- [10] 吴大正,杨林耀,张永瑞.信号与线性系统[M].北京:高等教育出版社,2005: 187-192.
- [11] 薛爱军,王晓丹,宋亚飞.基于移动散射点模型的雷达回波仿真及分析[J].计算机科学,2013,40(9): 201-207

〔责任编辑:祝剑〕

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>