

# 用空间传播和 RCS 模型研究 RFID 装置 最大识别距离

李卓凡，沙斐，陈嵩

(北京交通大学电子信息工程学院抗电磁干扰研究中心, 北京 100044)

**摘要：**通过自由空间传播模型和雷达散射横截面(RCS)模型, 研究了反向散射射频识别(RFID)装置的最大识别距离。用高频电磁场仿真软件 FEKO 对折叠偶极子标签天线进行了建模仿真, 得到天线的远场辐射方向图、输入阻抗以及在不同负载情况下天线的单站 RCS 值。经过理论分析和仿真计算, 由两个电波传播模型分别得出 RFID 装置可能的最大识别距离。最后比较了两种模型的计算结果, 较小的距离即为该反向散射 RFID 装置的最大识别距离。

**关键词：**射频识别；自由空间传播模型；RCS 模型；识别范围

中图分类号: TN011; TN95 文献标识码: A 文章编号: 1672-2337(2006)02-0115-06

## Study on the Maximum Identification Range of a RFID Device by Using Free Space Propagation Model and RCS Model

LI Zhuo-fan, SHA Fei, CHEN Song

(EMC Research Section, School of Electronic and Information Engineering,  
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** This paper introduces the study on the maximum identification range of the radio frequency identification (RFID) device by using the free space propagation model and the radar cross section (RCS) model. A folded dipole antenna is modeled and simulated by the software FEKO which is designed for the simulation of high frequency electromagnetic field. The far field radiation pattern, the input impedance and the mono static RCS of the antenna are obtained from the simulation results. Through theory analysis, simulation and calculation, each of maximum identification ranges of the RFID device is gained by using those two models respectively. The smaller one is the maximum identification range of the RFID device.

**Key words:** radio-frequency identification(RFID); free space propagation model; RCS model; identification range

## 1 引言

射频识别(RFID)技术是从上世纪 80 年代开始走向成熟的一项自动识别技术, 近年来发展十分迅速。RFID 技术被广泛应用于工业自动化、商业自动化、交通运输控制管理等众多领域, 例如汽车、火车的交通监控, 高速公路自动收费系统, 停车场管理系统, 物品管理, 流水线生产自动化, 出

入安全检查, 仓储管理, 动物管理, 车辆防盗等<sup>[1]</sup>。其中远距离 RFID 技术在以上应用中起着举足轻重的作用。由于无源标签具有重量轻、体积小、寿命长等优点, 故它在各个领域都有广泛的应用。对于工作在 860~960 MHz、2.45 GHz 和 5.8 GHz 等频段的反向散射无源标签, 其有效识别距离是评价 RFID 装置性能的主要指标。我们期望通过理论分析和计算机仿真来有效地确定反向散射无源标签 RFID 装置的最大识别距离和识别范围。

本文以一个工作频率为 2.45 GHz 的折叠偶极子标签天线为研究对象,用自由空间传播模型和雷达散射横截面(RCS)模型来研究它的最大识别距离,旨在找出合理有效的方法来研究该类 RFID 装置的有效识别范围。文中首先介绍电磁反向散射 RFID 的工作原理,然后介绍自由空间传播模型和 RCS 模型,接着进行建模仿真并给出计算结果,最后得出结论。

## 2 电磁反向散射 RFID 的工作原理

我们通过原理图(图 1)来分析反向散射无源标签 RFID 装置的工作原理。反向散射原理的基础是调制的 RCS(雷达截面)。根据雷达原理,当电磁波被大小超过波长一半的物体所反射时,物体反射电磁波的效率是由其反射横截面(RCS)来体现的。当物体与到达它的波前产生谐振时,其反射横截面尤其大。

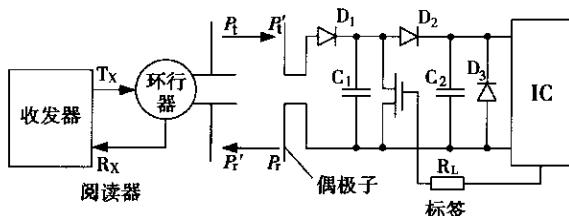


图 1 反向散射无源标签 RFID 装置的工作原理

如图 1 所示, 功率  $P_t$  是从阅读器天线发射出来的, 它的一部分(自由空间衰减)到达射频标签的天线。到达标签的功率  $P'_t$  在标签天线上产生高频电压, 经二极管  $D_1$  和  $D_2$  整流后, 作为标签的工作电源, 同时将标签从省电的“低功耗”模式激活到工作模式。这里使用的二极管是低阻挡层肖特基二极管, 这种二极管具有极低的门槛电压。所获得的电压足够用于短作用距离的能量供应。到达标签的功率  $P'_t$  一部分被天线反射, 返回功率为  $P_r$ 。天线的反射性能(等于反射横截面)会受连接到天线的负载变化的影响。为了把数据从标签传输到阅读器, 与天线并联的附加负载电阻  $R_L$ (由 MOS 管栅极电压控制的源-漏极电阻)的接通和断开要与传输的数据流一致, 以完成对由标签反射的功率  $P_r$  振幅的调制(调制后的反向散射)。

由射频标签反射的功率  $P_r$  经自由空间衰减后

一部分被阅读器天线接收。反射信号以“相反的方向”进入阅读器天线, 经环行器后, 送到阅读器的接收入口。这里, 阅读器发出的射频功率经环行器漏到接收端的功率经过隔离衰减得到充分抑制是实现收发分离的关键<sup>[2]</sup>。

## 3 自由空间传播模型

自由空间传播模型是: 当电磁波在理想的均匀的各向同性的自由空间介质内传播时, 将不出现折射、绕射、反射、吸收和散射等现象, 而只考虑由电波扩散而引起的传播损耗所得到的电波传播模型。由此模型, 可以得到阅读器天线辐射电磁波的自由空间场分布, 如果在空间某位置的场强足以激活射频标签, 那么该标签就有可能被识别。

由自由空间传播模型, 可得距阅读器天线  $R$  处的场强大小为

$$E(\text{dB}\mu) = 74.77 + P_t(\text{dBm}) + G_t(\text{dBi}) - 20\lg R \quad (1)$$

式中,  $P_t$  是阅读器的发送功率,  $G_t$  是阅读器天线的增益<sup>[4]</sup>。

考虑一个 RFID 系统, 阅读器天线的最大发射功率为  $P_t = 2 \text{ W}$ , 增益为  $G_t = 1.64(2.15 \text{ dBi})$ , 射频标签的激活场强为  $E_0 = 3 \text{ V/m}$ , 由式(1)可得最大激活距离  $R$  为 4.67 m。

有效识别取决于两个方面: 一个方面是在标签处要有足够大的场强来激活标签; 另一个方面是激活标签后标签反射回去的场强要高于阅读器的最小接收灵敏度。只有这两个方面同时满足才能保证有效识别。通过自由空间传播模型, 我们已经考虑了第一个方面, 即 RFID 系统的最大识别距离不可能超过 4.67 m。但能否达到这个最大距离, 还要看反射波的场强大小。下面讨论标签的 RCS, 求得反射波在接收天线处场强达到最小灵敏度时, 标签与阅读器天线的最大距离。

## 4 RCS 模型

当物体被电磁波照射时, 能量将朝各个方向散射, 散射场与入射场之和构成了空间的总场。定量表征目标散射强弱的物理量就是目标对入射雷达波的有效散射截面积, 简称雷达截面(RCS, Radar Cross Section)<sup>[3]</sup>。雷达目标反射或散射的

能量可以表示为一个有效面积与入射雷达波功率密度的乘积,这个面积就是雷达截面,用符号 $\sigma$ 表示。对于单站和双站散射,分别称为单站(或后向)雷达截面和双站雷达截面。对于RFID系统,由于阅读器收发信号都通过一个天线,因此标签的雷达截面属于单站雷达截面。RCS是目标反射电磁波能力的量度,它的大小取决于一系列参数,例如目标的大小、形状、材料、表面结构以及波长和极化方向。

对于RFID系统,由RCS模型<sup>[4]</sup>可知阅读器天线的接收功率为

$$P'_r(\text{dBm}) = P_t(\text{dBm}) + 2G_t(\text{dBi}) + 20\lg\lambda + \sigma(\text{dBm}^2) - 30\lg 4\pi - 40\lg R \quad (2)$$

由已知条件可将上式简化为

$$P'_r(\text{dBm}) = -13.9 \text{ dB} + \sigma(\text{dBm}^2) - 40\lg R \quad (3)$$

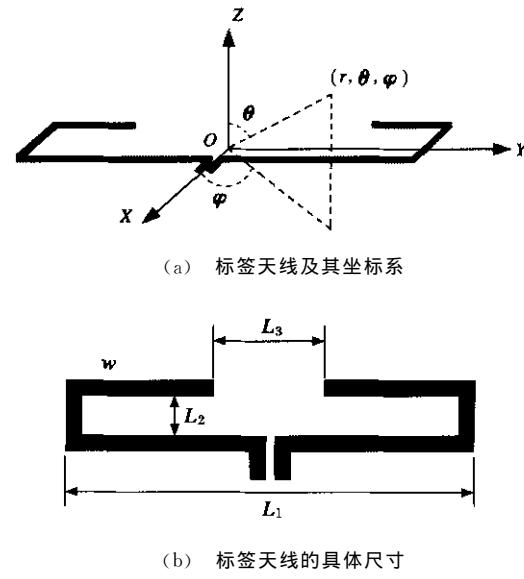
## 5 折叠偶极子标签天线的建模仿真

对于射频标签天线来说,希望得到较大的RCS。根据天线的特性和散射体的谐振散射特征可知,当阅读器天线发射的电磁波的频率为标签天线的谐振频率,且电磁波的极化方向与标签天线的极化方向相同时,可以得到最大的RCS。下面对图2所示的折叠偶极子标签天线<sup>[6]</sup>进行电磁场仿真,一方面用以验证理论结果,另一方面得出在不同负载阻抗下的RCS值,进而由RCS传播模型得出最大识别距离,并与自由空间传播模型相比较。

考虑如图2所示的折叠偶极子标签天线,其中, $L_1$ 为40 mm, $L_2$ 为2 mm, $L_3$ 为15 mm, $W$ 为0.5 mm,引线长度为1 mm,引线间隙为0.4 mm,设计频率为2.45 GHz。

采用高频电磁场仿真软件FEKO对该天线进行建模仿真,得出该天线的输入阻抗和在不同负载下的RCS值。我们希望通过RCS来分析RFID的识别距离,因此这也是本文的重点。FEKO的理论基础是矩量法(MoM),同时又综合了物理光学法(PO)和一致性几何绕射理论(UTD)等高频方法。由于这里考虑的是半波偶极子天线,它属于电小尺寸,因此运用矩量法就足以解决问题。

按照图2(a)所示图形和图2(b)所示尺寸,在



(b) 标签天线的具体尺寸

(a) 标签天线及其坐标系

图2 折叠偶极子标签天线

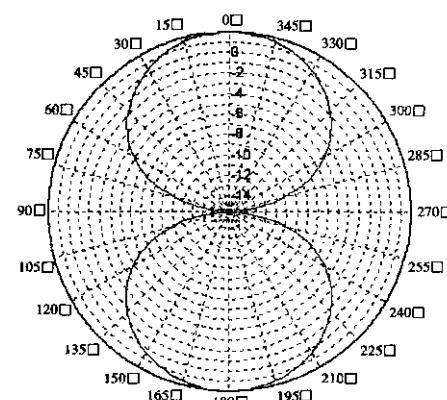
FEKO中建模、仿真。最后得到结果如下:

### (1) 折叠偶极子天线的辐射方向图和输入阻抗

由FEKO仿真得出图2折叠偶极子天线的远场辐射方向图如图3所示,其中图3(a)是 $\theta$ 为90°的平面上的辐射方向图,图3(b)是 $\varphi$ 为0°的平面上的辐射方向图。

由图3(a)和图3(b)可以看出, $\theta$ 为90°, $\varphi$ 从0°到360°的平面上的辐射方向图与一般半波偶极子天线的方向图很相似。然而,在 $\varphi$ 为0°, $\theta$ 从0°到360°的平面上的辐射方向图却与半波偶极子天线的方向图差别较大,此时两个主瓣已经明显不对称。这是由折叠部分引起的。

仿真可得天线的输入阻抗为 $(135.22 + i339.18)\Omega$ 。



(a)  $\theta$ 为90°的平面上的辐射方向图

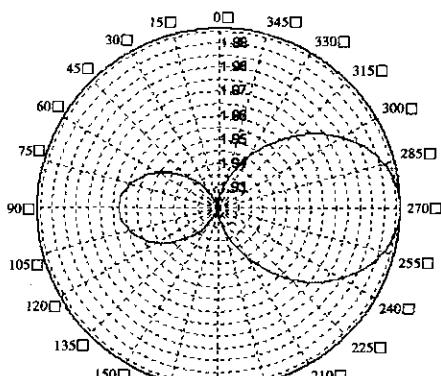
(b)  $\varphi = 0^\circ$  的平面上的辐射方向图

图 3 折叠偶极子天线的远场辐射方向图

## (2) 不同负载阻抗下天线的 RCS

我们给天线加载不同的负载阻抗,以模拟标签天线负载的变化。分别仿真了四个不同负载阻抗下标签天线的 RCS 值,以验证反向散射原理。

图 4 为在四个不同的负载阻抗下,在  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\theta$  从  $-90^\circ$  到  $90^\circ$  方向上的单站 RCS 值。

四个不同负载阻抗下的最大 RCS 值如表 1 所示。

表 1 在四个不同负载阻抗下天线的最大 RCS 值和最大识别距离

负载阻抗 / $\Omega$	最大 RCS/dBm <sup>2</sup>	最大 RCS/m <sup>2</sup>	最大识别距离 / m
0	-19.46	$1.13 \times 10^{-2}$	30.80
50.00	-26.58	$2.19 \times 10^{-3}$	21.77
135.22 + i399.18	-41.74	$6.68 \times 10^{-5}$	9.09
135.22 - i339.18	-37.15	$1.92 \times 10^{-4}$	11.84

考虑阅读器的接收灵敏度为  $-104$  dBm,令  $P'_r(\text{dBm}) = -104$ ,由式(3)可得,从 RCS 模型得到的 RFID 的最大识别距离如表 1 所示。与自由空间模型相比,该反向散射 RFID 系统的最大识别距离主要取决于发射功率,而受 RCS 影响不大。然而,我们在此研究的是最大识别距离,考虑的是最大 RCS,而并没有考虑标签处于不同方位时的 RCS 值。

## (3) 当极化方向有偏离时 RCS 值的变化

在实际应用中,标签的极化方向与阅读器天线的极化方向可能不在同一个方向上,这将产生三方面的影响:第一,标签不能最有效地接收阅读器天线发出的电磁波,即接收功率将会下降,由自由空间传播模型可知,标签的激活距离将会减小;第二,标签的 RCS 值将下降,反向散射波的强度将降低,同样导致识别距离减小;第三,反向散射波的极化方向与阅读器天线的极化方向同样会有偏

离,这将导致阅读器天线接收反向散射波性能的下降。由图 4 可以看出,对于不同的天线负载阻抗,当  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\theta$  从  $-90^\circ$  变化到  $90^\circ$  时,单站 RCS 总是先增大后减小,而且十分对称。这是因为在  $\theta$  变化的过程中,入射平面波的极化方向与标签天线的极化方向的夹角先由  $90^\circ$  减小到  $0^\circ$ ,再由  $0^\circ$  变化到  $90^\circ$ 。可以看出,当夹角趋于  $90^\circ$  即入射平面波与标签天线的极化方向严重失配时,RCS 值急剧减小。因此在实际应用中,当阅读器天线与标签天线的极化方向不一致时,识别距离将会缩短。

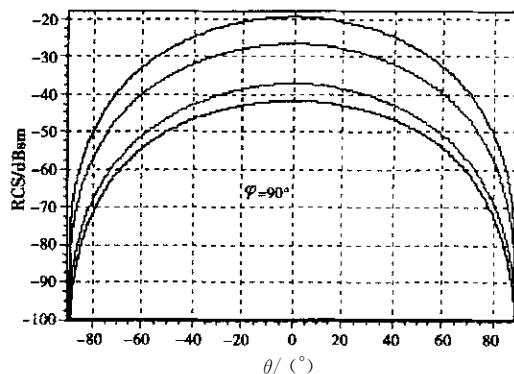


图 4 在四个不同负载阻抗下单站 RCS 值的变化

## (4) 具有平板反射器的折叠偶极子天线的 RCS

反射器被广泛地用来改变辐射单元的波瓣图。现考虑具有平板反射器的折叠偶极子天线。由于平板反射器的存在,该标签天线的前向辐射增益将增大,其 RCS 值也将增大。为了方便处理问题,考虑在距离折叠偶极子天线  $\lambda/8$ 、 $\lambda/16$ 、 $\lambda/32$  和  $\lambda/64$  处具有  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  的理想导电平板反射器。仿真得出了其辐射方向图和单站 RCS 的变化图,而且与没有反射器时的情况作了比较。

仿真得到四种情况下单站 RCS 的变化如图 5 所示,它们的变化趋势是一样的。理想导体板近似镜面的强烈反射,使得由理想导体板引起的 RCS 值将折叠偶极子天线的 RCS 几乎完全淹没掉,因此由天线负载阻抗的变化产生的天线 RCS 的变化在总的 RCS 中根本无法体现。由此可以看出,如果标签位于金属物体的表面,那么 RFID 装置的识别性能将下降。但是,所得 RCS 是总场的 RCS,而数据只体现在由负载变化所产生的调制的 RCS 中,因此若采用性能较好的窄带滤波器,则仍能将有用信号分离出来。反射器究竟对识别产生多大的影响,还需通过实验来验证。在同样条件下,仿真得到标签天线的辐射方向图分别如图 6 中

的(a)和(b)所示。将其与图3比较可知,由于反射器的存在,标签天线的方向图有了明显的变化,其方向性有了明显的改善。因此,从标签接收阅读器天线辐射场的角度来说,带有反射器的标签将比不带反射器的标签具有更大的识别距离。但最终的最大识别距离取决于两个方面的最小值。笔者将在以后对此作进一步研究。

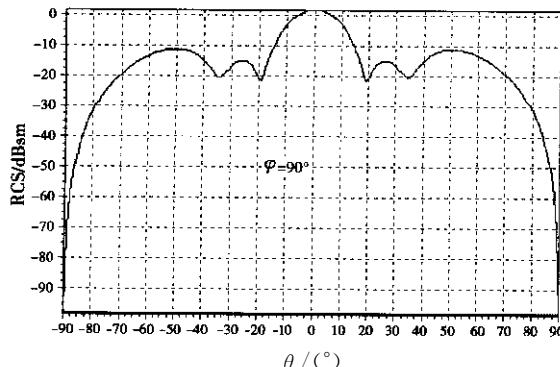
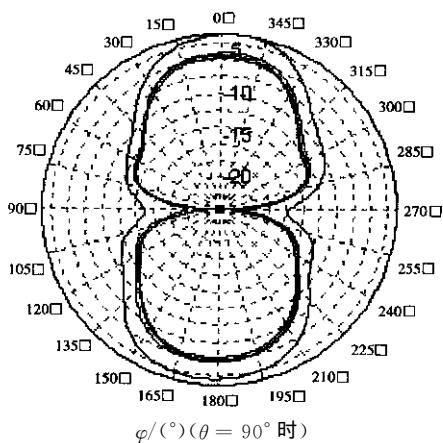
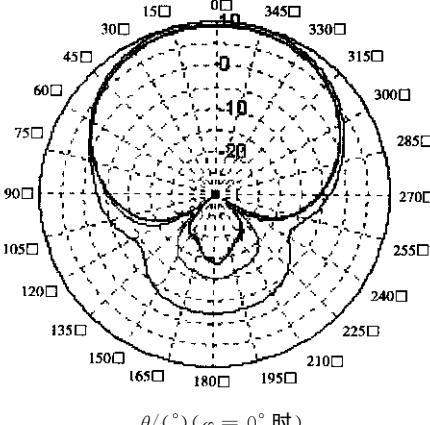


图5 在四个不同距离和负载阻抗下单站RCS值的变化



(a)  $\theta$  为  $90^\circ$  的平面上的辐射方向图



(b)  $\varphi$  为  $0^\circ$  的平面上的辐射方向图

图6 带有平板反射器的折叠偶极子天线的远场辐射方向图

## 6 结束语

本文通过自由空间传播模型和雷达散射横截面(RCS)模型研究了反向散射RFID装置的最大识别距离。用高频电磁场仿真软件FEKO对折叠偶极子标签天线进行建模仿真,得出天线的远场辐射方向图、输入阻抗以及在不同负载情况下天线的单站RCS值。经过理论分析和仿真计算,分别由两个电波传播模型得出RFID装置可能的最大识别距离。比较两种模型的计算结果,可以得到在阅读器天线和标签天线的参数确定的情况下,反向散射RFID装置的最大识别距离主要取决于阅读器的最大发射功率和标签天线的RCS值。由于条件的限制,未能进行实际测试,只作了理论分析和仿真计算。另外,本文只是对反向散射无源标签RFID装置的最大识别距离进行了研究分析,而对整个识别范围以及实际工作环境下识别性能的研究,将是今后工作的重点。

## 参考文献:

- [1] 游战清,李苏剑. 无线射频识别技术(RFID)理论与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2004;12-14.
- [2] Klaus Finkenzeller. 射频识别(RFID)技术[M]. 陈大才,译. 北京:电子工业出版社, 2001;36-38.
- [3] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1998;30-42.
- [4] Rappaport T S. 无线通信原理与应用[M]. 蔡涛,李旭,杜振民,译. 北京:电子工业出版社, 1999;50-52, 74.
- [5] Foste P R, Burberry R A. Antenna Problems in RFID Systems[C]. IEE Colloquium on RFID Technology, Oct 25, 1999;3/1-3/5.
- [6] Qing Xianming, Yang Ning. A Folded Dipole Antenna for RFID[C]. Antennas and Propagation Society Symposium, 2004. Vol. 1, June 20~25, 2004:97-100.

## 作者简介:



李卓凡 男,1980年生于河南洛阳,2003年获信阳师范学院理学学士学位,现为北京交通大学通信与信息系统专业硕士研究生,研究方向为电磁兼容技术和射频识别技术。

沙斐男,1946年生于上海,教授,博士生导师,现为北京交通大学抗电磁干扰中心主任,中国电子学会、铁道学会、计量学会高级会员,电源学会理事、北京市学位委员会学科评议组成员、IEEE北京分部执委会委员、中国实验室国家认可委员会电磁兼容技术分委会副主任、全国无线电干扰标准化技术委员会I分委会副主任、IEEE/EMC letter文摘委员会中国委员;主要研究方向为动力、信号、通信、控制系统中电气电子设备的电磁干扰和抗干扰;自1990年以来主持、参加部市级和国家自然科学基金项目21项,获部市级奖5项,发表论文60余篇。

(上接第108页)基本能够适应密集复杂的雷达信号环境,能够快速有效地进行分选。其分选速度和性能都远优于扩展关联法,因而是一种可行的实时分选方法。

(2) PRI变换法能够有效地抑制子谐波,但是其运算量较CDIF和SDIF方法增大了许多。

(3) 对一些特殊体制的雷达,特别是PRI不规则变化的雷达的信号,扩展关联法、差直方图法以及PRI变换法等有时难以自动分选。

(4) TOA折叠分选作为一种辅助分选方法,能够适应比较恶劣的信号环境,能对一些特殊体制的雷达信号进行分选,能很好弥补差直方图法等实时分选方法的不足。

## 参考文献:

- [1] 罗景青,贺平. 雷达对抗原理[M]. 合肥:解放军电子工程学院出版社, 2003.

信、控制系统中电气电子设备的电磁干扰和抗干扰;自1990年以来主持、参加部市级和国家自然科学基金项目21项,获部市级奖5项,发表论文60余篇。

陈嵩男,1976年生于河南平顶山市,1997年毕业于华北电力大学(北京),现为北京交通大学抗电磁干扰研究中心博士研究生,研究方向为电气电子设备的电磁兼容。

[2] 赵仁健,龙德浩,熊平,等. 密集信号分选的平面变换技术[J]. 电子学报, 1998, 26(1): 77-82.

[3] Mardia H K. Digital Signal Processing for Radar Recognition in Dense Radar Environments[D]. Electrical Engineering Department, Leeds University, 1988: 32-115.

## 作者简介:



王杰贵男,1969年生于安徽桐城,博士,解放军电子工程学院副教授,主要研究方向为雷达对抗、信号处理和数据融合。



靳学明男,1967年出生于安徽安庆,1989年毕业于重庆大学电子工程专业,现为华东电子工程研究所副总工程师,研究员,主要从事雷达接收机及波形产生的研制工作,近期主要研究内容为DDS技术应用、数字接收机技术等。

## 雷达散射截面（RCS）分析培训课程

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，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、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。

雷达散射截面（Radar Cross Section，简称 RCS）是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

---

### HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

---

### ● 更多培训课程：

#### ● **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

#### ● **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

#### ● **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>