

文章编号:1005-6122(2006)06-0034-03

# 分形开槽减缩微带天线 RCS<sup>\*</sup>

张宏波 龚书喜 贺秀莲

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室,西安电子科技大学,西安 710071)

**摘要:** 分形由于其独特的结构及性能早已在天线的设计中有所应用,但较少地应用于天线雷达散射截面减缩。本文首次将分形思想应用到开槽微带天线中。设计了一副分形开槽微带天线,与常规微带天线相比,在辐射性能降低不多的同时较好地实现了整个频带 RCS 减缩。

**关键词:** 分形开槽,微带贴片天线,天线雷达散射截面减缩

## Fractal Slot for Microstrip Patch Antenna RCS Reduction

ZHANG Hong-bo, GONG Shu-xi, HE Xiu-lian

(National Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Fractal structure has been used for antenna design for the unique structure and performance, however it is seldom used in antenna radar cross section reduction. In this paper, fractal slot is used to reduce RCS of microstrip antenna for the first time. A fractal slot microstrip patch antenna is designed, comparing with the conventional microstrip antenna, RCS is greatly reduced with less loss in radiation performance within the operation frequency band.

**Key words:** Fractal slot, Microstrip patch antenna, Antenna radar cross section reduction(RCSR)

## 引言

目标的雷达散射截面(RCS)是雷达探测技术、隐身和反隐身技术的一个重要特征参数,是表征目标散射特性的一个最基本的参数。随着隐身技术的日趋成熟,通过改变外形和使用雷达吸波材料可以减小军事平台的雷达散射截面。但是对于隐身平台来说,对其总 RCS 贡献较大的却是平台上的天线,而由于天线系统自身性能要求,使得常规的隐身措施不能完全在天线隐身中获得应用,因此降低天线系统的 RCS 成为隐身系统中一个关键的技术课题。

要求雷达天线系统只辐射和接收我方雷达波,不反射和散射敌方雷达波,这是一对很难解决的矛盾。目前只能从实际出发,在一定的时域、空域和频域范围内,尽量缓和或回避这种矛盾,形成在一定限制条件下的天线系统隐身方案<sup>[1]</sup>。

分形是具有分数维的通过迭代产生的具有自相似性的结构,自相似性通俗地说,就是局部的形态与

整体形态的各自相似性。以前分形技术在微带天线上的应用主要是贴片分形<sup>[2]</sup>,本文所做的研究是将分形运用在开槽上,来实现天线的 RCS 减缩。

## 1 微带天线的散射及 RCS 减缩机理

一般微带天线结构如图 1 所示,假设微带贴片表面产生的电流为  $J_s$ ,令

$$J_s = I_s J_b(r) \quad (1)$$

其中  $J_b(r)$  是跟来波无关的模函数,幅度  $I_s$  取决于来波的幅度和极化。假设来波为  $\mu$  极化,波源在  $r_1$  处,来波方向为  $(\theta_1, \phi_1)$ ,散射为  $\nu$  极化,方向  $(\theta_2, \phi_2)$ ,此时,散射截面公式可表示为:

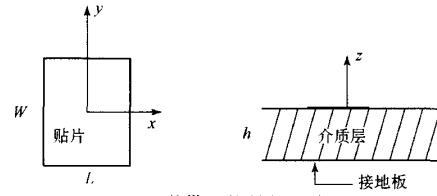


图 1 微带天线结构示意图

\* 收稿日期:2005-05-19;定稿日期:2005-09-09

$$\sigma_{uv} = \frac{\lambda_0^2}{\pi} \left( \frac{R_s}{|Z_s|} \right)^2 e_r^2 C_u(\theta_1, \phi_1) C_v(\theta_2, \phi_2) \quad (2)$$

其中  $e_r$  是物体辐射的效率, 定义为辐射功率与输入功率的比值  $e_r = P_{re}/(P_{rb} + P_{db})$ , 这里  $P_{db}$  表示消耗的功率, 是金属贴片消耗功率、介质消耗功率及表面波功率之和, 介质无耗且金属消耗功率不计的情况下, 它就等于表面波功率; 另外  $Z_s = -\langle \mathbf{J}_b, \mathbf{J}_b \rangle$ ,  $R_s = \text{Re}\{Z_s\}$ ;  $C_u(\theta_1, \phi_1)$  表示微带天线在  $(\theta_1, \phi_1)$  方向的  $\mu$  极化方向增益,  $C_v(\theta_2, \phi_2)$  表示微带天线在  $(\theta_2, \phi_2)$  方向的  $\nu$  极化方向增益<sup>[3]</sup>。

从式(2)可以看出, RCS 跟天线方向增益、天线的辐射效率以及  $(R_s/|Z_s|)^2$  的比值有关。对天线来说, 本身增益降低, 辐射效率降低也能达到 RCS 减缩的目的。增加介质损耗或者在金属贴片上覆盖介质层都可以降低辐射效率。RCS 最后一个因子  $(R_s/|Z_s|)^2$  表示了散射体的阻抗特性对 RCS 的影响。当天线的阻抗实部相对天线总的阻抗比值减小, 那么 RCS 也能得到减缩。这就意味着对具体的微带天线来说, 天线终端接适当负载也能达到减小 RCS 的目的。而加载短路探针相当于引入了电纳<sup>[4]</sup>, 因此能够降低 RCS。经实验考察知, 靠近边缘加载, 带外 RCS 有明显减缩, 但同时谐振频率会升高, 增益有所下降; 相反, 在中心加载, RCS 几乎没有减缩, 但辐射性能有所改善。

对于波导缝隙天线, 所开的槽如果在截断电流方向, 则电流一部分以位移电流连续外, 另一部分在槽两端分流, 分流电流在槽两边方向相反, 从而引起电流突变<sup>[5]</sup>。考察微带开槽天线得知, 电流在槽两端同样分流, 且方向相反, 由于微带贴片天线可以看作是一个微带传输线, 因此这种电流的突变可以等效为阻抗加载, 它可以调节天线的输入阻抗及  $(R_s/|Z_s|)^2$ , 从而改变雷达散射截面的大小。另外, 电流沿着槽周围弯曲的路径流动, 会增加电流线长度, 从而减小天线的谐振面积, 以达到微带天线 RCS 减缩的目的。但是, 开槽并不是简单的阻抗加载, 它还可以看作在减小原贴片镜面反射的基础上引入了一个回波源, 通过调整槽的位置及大小, 可以控制其散射波的相位, 使其与其它回波相位相反, 从而达到 RCS 减缩的目的。而分形开槽由于其自相似的层次结构, 带来电磁特性的自相似, 使得分形槽四周的散射场更可能充分抵消。

## 2 分形开槽在微带天线 RCS 减缩中的应用

分形在天线阵列中的应用已经较广, 而且也取得了相当不错的效果, 由此联系到开槽减缩 RCS, 可以将分形的概念应用到槽的位置及形状的设计上, 但若要在一个独立天线中应用分形技术, 首先需要保证天线有正常的工作性能, 所以这里的分形开槽不是严格意义上的分形, 只是局部的自相似性和对称结构。

首先, 我们设计一个谐振频率在 3GHz, 辐射性能良好(增益 6dBi 以上, 带宽 2% 以上)的常规矩形微带贴片天线, 其结构及参数含义如图 1 所示。天线的相对介电常数  $\epsilon_r = 2.62$ ,  $h = 1.8$  mm,  $L = 29.24$  mm,  $W = 37$  mm。如果选择贴片的中心为坐标原点(坐标系参见图 1), 馈电点坐标位置为(-5.7, 0), 此时天线的带宽为 2.2%, 增益为 6.73dBi。

对贴片开槽之前, 先将原天线贴片分割成 10 行  $\times$  10 列即 100 片原贴片 1/100 大小的小贴片, 这样小贴片与原贴片就有了自相似性, 然后在对称、分形的基础上挖掉某些贴片, 这样形成的槽就具有某些分形结构, 经过多次的仿真实验, 设计了一个能降低 RCS, 同时辐射性能影响不大的分形开槽天线。

如图 2, 若我们用  $(i, j)$  表示第  $i$  行  $j$  列个小贴片, 则分别去除  $(2, 2)$ 、 $(2, 4)$ 、 $(2, 7)$ 、 $(2, 9)$ 、 $(3, 2)$ 、 $(3, 3)$ 、 $(3, 4)$ 、 $(3, 7)$ 、 $(3, 8)$ 、 $(3, 9)$ 、 $(4, 3)$ 、 $(4, 8)$ 、 $(7, 3)$ 、 $(7, 8)$ 、 $(8, 2)$ 、 $(8, 3)$ 、 $(8, 4)$ 、 $(8, 7)$ 、 $(8, 8)$ 、 $(8, 9)$ 、 $(9, 2)$ 、 $(9, 4)$ 、 $(9, 7)$ 、 $(9, 9)$  处小贴片得到分形天线, 与原天线相比较, 谐振频率降低(可以实现小型化), 由于短路针能升高谐振频率和减缩 RCS, 所以在坐标点位置(11.5, 0)处加载短路针调整频率至 3GHz, 再在(0, 0)处加载短路针改善其辐射性能。仿真得 3 GHz 峰值处增益为 5.04dBi, 下降约 1.7dB, 带宽为 1.9%, 分形贴片天线与原天线远场方向图对比见图 4, 可以看出它们有着相似的方向图。用入射角为  $\theta = 60^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$  的平面波照射, 如图 3 所示, 与原天线单站 RCS 相比, 3 GHz 谐振点 RCS 峰值下降为 -30.39 dB, 下降约 6.4 dB, 另一峰值处更是下降约 24 dB, 另外整个 2.5 ~ 7.5 GHz 频段几乎都有大的减缩。

分形开槽天线之所以能实现 RCS 减缩, 一方面是因为它的自相似和对称特性; 二是因为槽的形状, 突起和凹下部分, 使得电流线转折较多, 如图 5, 这

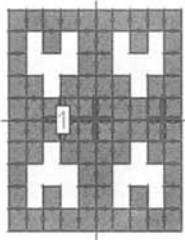


图2 分形开槽微带贴片

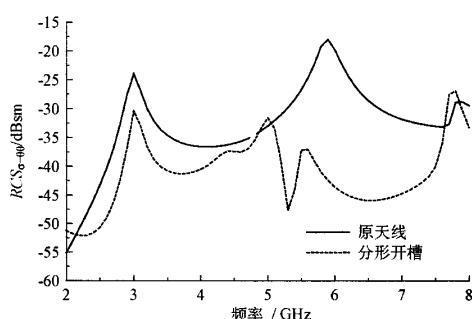


图3 分形天线与原天线 RCS 对比

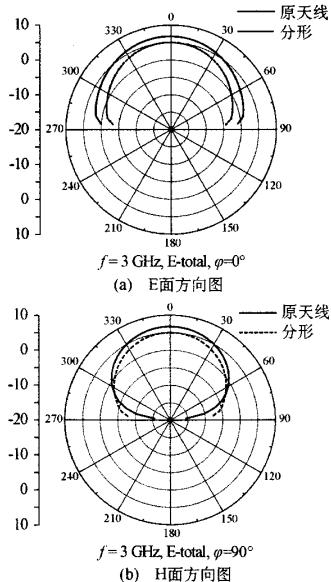


图4 分形开槽天线与原天线的远场方向图

样较多电流互为反向,这两方面的因素使得贴片的散射大部分抵消掉,而由于原天线边缘结构几乎不受破坏,天线的辐射性能相对影响不多,增益的下降主要是由于短路针靠近边缘加载引起,但同时可以看到,短路针加载使得带外 RCS 减缩效果非常明显,带外峰值处更是减少近 24dB。

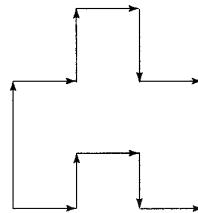


图5 分形开槽电流

### 3 结论

本文研究了分形开槽减缩微带天线 RCS 机理,设计了同时具有低 RCS 特性和良好辐射特性的分形开槽微带天线,与其它减缩 RCS 的方法相比,这种方法不仅减缩效果明显,保证了天线良好的辐射性能,而且对天线带内同极化隐身这项困难的任务取得了一定的进展。对凹凸槽进一步分形及结合加载短路针等方法能进一步减缩 RCS 和改善天线的辐射性能,深入开展这方面的研究工作具有重要的工程意义。

### 参 考 文 献

- [1] 阮颖铮,等. 雷达散射截面与隐身技术. 北京: 国防工业出版社, 1998
- [2] 刘英, 龚书喜, 傅德民. 分形在雷达散射截面减缩中的应用. 微波学报, 2003, 19(2): 28~30
- [3] Jackson D R. The RCS of a rectangular microstrip patch in a substrate-superstrate geometry. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1990, 38(1): 2~8
- [4] 钟顺时, 微带天线理论与应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991
- [5] 周朝栋, 等. 天线与电波. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994

**张宏波** 男, 1979 年生, 西安电子科技大学天线与电磁散射研究所硕士研究生, 主要研究方向为电磁散射及天线 RCS 的减缩、微带天线、喇叭天线等。

E-mail: nicai1688@sohu.com

**龚书喜** 男, 1957 年生, 现为西安电子科技大学教授, 博士生导师, 天线与电磁散射研究所所长, 主要研究方向为天线与电磁散射理论等。

**贺秀莲** 女, 1977 年生, 西安电子科技大学天线与电磁散射研究所博士生, 主要研究方向为微带天线数值计算、电磁散射等。

## 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>