

# 编分形天线

李 勇, 王友善, 杜星文

(哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150080, E-mail: hexidian@163.com)

**摘 要:** 将太阳帆、印刷工艺和分形理论相结合, 提出“编分形天线”的概念. 与充气抛物面天线相比, 具有精度要求更低、寿命更长、形式灵活多样并可实现多频段通信等优点. 线帆合一, 可以降低发射成本, 简化探测器的结构, 提高通信质量和增加系统可靠性.

**关键词:** 编结构; 太阳帆; 分形; 天线; 抛物面

**中图分类号:** V423.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2007)07-1080-04

## Gossamer fractal antenna

LI Yong, WANG You-shan, DU Xing-wen

(Harbin Institute of Technology, Center for Composite Materials, Harbin 150080, China, E-mail: hexidian@163.com)

**Abstract:** A new concept - Gossamer Fractal Antenna is proposed on the base of solar sailing, printing process and fractal theory. It behaves longer duration, more flexible configuration and MIMO communication and demands lower surface accuracy compared with the inflatable paraboloid. The integrated sailing can reduce overall space mission cost, simplify the structure of spacecraft and improve communicative quality and system security.

**Key words:** gossamer; solar sailing; fractal; antenna; paraboloid

编结构可用于外层空间天线、地球辐射仪、雷达、太阳能集中器、望远镜、遮阳板、太阳帆、太阳能电池阵列和宇宙飞行器支柱等. 其中, 空间充气天线和太阳帆是当前的两大热点, 因为天线要求具有很高的表面精度而太阳帆要求面密度非常小. 形状精度和面密度是编结构的两大关键技术.

近年来, 有将太阳帆飞行器的动力与通信相结合的讨论, 以降低发射成本、简化探测器的结构. Wüest 提出多功能薄膜的概念, 将太阳能电池、天线、传感器、热控装置等集成到帆面上<sup>[1]</sup>. McInnes 提出, 通过主动控制, 帆面能在太阳能集中器和天线的形状之间相互转换<sup>[2]</sup>. Khayatian 提出, 利用帆面制作菲涅耳天线<sup>[3]</sup>. 将太阳帆与充气天线合二为一, 是未来星际探测飞行器设计的一个趋势.

## 1 太阳帆

目前, 预期有物质-反物质推进、核动力和太

阳帆板 3 种主要技术可以实现星际旅行. 最受关注的推进方法是太阳帆<sup>[4]</sup>. 太阳帆探测器不需要随身携带推进器和燃料, 可以提高有效载荷能力和降低旅行时间. 太阳帆的速度随着时间的推移, 会越来越高, 最终能够飞出太阳系, 进行星际旅行. 在薄膜材料、新型高温帆板基体和轻质梁方面的进展使帆板具有高性能、低成本的潜力, 使太阳帆板成为一种高收益的太空运输技术.

### 1.1 来自光压的太阳帆动力

太阳帆的动力来源为光压和太阳风. 根据量子力学理论, 光子具有  $h/\lambda$  的动量 ( $h$  是普朗克常数,  $\lambda$  为波长), 从而形成光压. 太阳光的压强是很微小的, 绝对黑体受到的光压只有  $4.55 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$ . 假设太阳光以  $\alpha$  的角度照射在面积为  $A$  的太阳帆的帆面上<sup>[5]</sup>, 并考虑帆与太阳距离的影响<sup>[6]</sup>, 则产生的推力为

$$F_1 = (1 + \eta) w A c^{-1} (r_0/r)^2 \cos^2 \alpha. \quad (1)$$

式中:  $F_1$  为阳光产生的推力, N;  $\eta$  为帆面的反射效率;  $w$  为 1 AU 的距离上的太阳常数,  $1353 \text{ W/m}^2$ ;  $c$  为光在真空中的速度,  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ;  $r_0$  为地球到太

收稿日期: 2005-08-25.

作者简介: 李 勇(1974—), 男, 博士;

杜星文(1937—), 男, 教授, 博士生导师.

阳的距离, 1 AU;  $r$  为太阳帆到太阳的距离, AU.

太阳在电磁波辐射的同时, 还进行粒子辐射(主要为电离氢和电离氦), 形成太阳风——速度为  $(0.3 \sim 1) \times 10^6$  m/s 的气流, 其密度在 1 AU 处为  $1 \sim 30 \times 10^6$  个氢原子/m<sup>3</sup> 并近似地与距离的平方成反比. 太阳风的速度在太阳系范围内大致保持不变<sup>[7]</sup>. 假设太阳风以  $\alpha$  的角度和速度  $v$  冲击在面积为  $A$  的太阳帆的帆面上, 并被以速度  $\eta v$  反射回去. 根据动量守恒定律, 其产生的推力为

$$\frac{D}{Dt}(mv) = F_w,$$

在帆面法线方向, 可改写为

$$m(1 + \eta)vcos\alpha = F_w t.$$

而

$$m = nMAvt(r_0/r)^2 cos\alpha,$$

可得

$$F_w = (1 + \eta)nMAv^2(r_0/r)^2 cos^2\alpha. \quad (2)$$

式中:  $n$  为原子数分布密度;  $F_w$  为太阳风产生的推力, N;  $M$  为每个原子的质量, kg;  $v$  为风速, m/s.

根据式(1)可得光压在地球轨道处 1 km<sup>2</sup> 的帆面上产生的推力大约为 9 N. 根据式(2), 当太阳黑子处于活跃期时, 可得太阳风在地球轨道处 1 km<sup>2</sup> 的帆面上产生的最大推力大约为 0.1 N; 宁静时期约为 0.002 N. 由此可以看出, 光压产生的推力比太阳风高出 2~3 个数量级. 因此, 太阳帆的推力主要来自光压, 太阳风的作用可以忽略.

## 1.2 太阳帆的设计要求

太阳帆的主要性能参数为面密度, 太阳帆的密度要求的变化范围从近期的试样探测器的 20 g/m<sup>2</sup> 到星际探测器的 1 g/m<sup>2</sup>. 尺度变化范围从数十米的、具有适中要求的小型飞船到数百米、大型的飞出太阳系的探测器.

太阳帆的基本结构有方形和直升机式两种. 方形帆由镀金属的塑料薄片和张开的轻质支撑梁组成, 帆的角落装有小叶轮张紧装置, 旋转时, 产生不同的光压强差来操纵太阳帆; 也可以通过质心和光压强中心的相对移动来操纵太阳帆. 方形帆的操作反应速度快, 适于探测器的逃逸和入轨<sup>[4]</sup>. 直升机式太阳帆能象直升机叶片一样旋转, 帆材料的薄片由向心加速度导开和定位, 通过改变叶片的倾角进行操纵. 直升机式比方形帆容易展开, 随机扰动(由于转动惯性)的稳定性好. 但是, 由于转动惯性, 操作反应速度慢.

太阳帆具有数百平方米的帆面, 将成为天线的良好载体.

## 2 分形天线

20 世纪 70 年代 Mandelbrot 在 Hausdorff 测度的基础上, 将分数维和具有自相似特点的自然现象集成在一起, 创立了分形理论, 其概念为: 研究部分以某种形式与整体相似的几何形状<sup>[8]</sup>. 分形几何的主要特点为自相似性和标度不变性, 即将图形的某一部分放大, 可与整体相重合<sup>[9]</sup>. 自 1995 年提出分形天线的概念之后, 分形天线以无可比拟的优越性得到了迅速发展, 并成为下一代 MIMO 天线的首选.

分形天线设计的研究主要包括具有分形结构的单元和具有分形排列的天线阵列两个方面. 分形天线单元主要有: Cantor 尘、Koch 曲线、Sierpinski 垫、Sierpinski 毯、Peano 曲线等. 其中, Sierpinski 分形研究得最多.

### 2.1 分形天线的多频段或宽频特点

天线的带宽是由其几何形状决定的. 偶极子天线只有一个特征长度, 因此, 它仅有唯一的谐振频段和很窄的带宽; 而对数周期天线和螺旋天线具有多个特征长度, 具有更宽的频带. 自相似几何形状天线具有多个谐振频率, 形成多频段. 例如, 四次迭代的 Sierpinski 垫<sup>[8]</sup>, 它有 4 种不同尺度的单元:  $OA_1B_1$ 、 $OA_2B_2$ 、 $OA_3B_3$ 、 $OAB$ , 而谐振波长约为三角形单元高度的两倍, 从而形成 4 个频段. 如果谐振频率相隔较近, 其频带就会联成一个宽频, 如 Sierpinski 毯<sup>[9]</sup>.

### 2.2 分形天线的高阻抗特点

分形曲线多具有空间填充性, 即在有限面积上, 分形曲线的长度趋于无穷. 此特点能有效地提高天线的辐射阻抗、降低天线的  $Q$  值. 从而, 随着分形曲线叠代次数的增多, 天线效率提高, 功率增大. 但是, 随着电长度的增加, 特性阻抗升高, 将导致工作频带变窄.

分形天线的其他优点还包括: 缩减天线尺寸; 减少天线单元的相互耦合; 增加方向性系数, 减小副瓣; 简化电路设计, 减低成本; 适合任何频段.

分形天线的主要缺点是单元形状复杂, 加工精度要求高. 而印刷工艺可以克服这一缺点. 印刷天线具有质量轻, 结构简单, 成本低、易集成等优点而获得了广泛应用.

## 3 充气抛物面天线

目前, 各航天大国都在竞相发展空间充气天线. 其中, 抛物面天线由于其高效率而成为研究热点. 图 1 为哈尔滨工业大学正在开发中的充气抛

物面天线. 截止 2005 年 5 月, 充气天线方面的专利一共申请了 41 项, 其中涉及抛物面的为 18 项, 而平面天线仅为 2 项 (还仅仅是涉及).

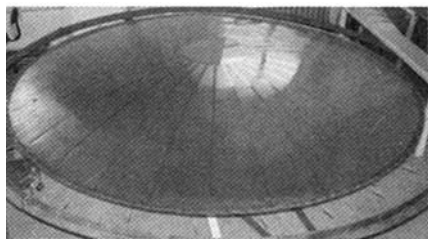


图1 充气抛物面

### 3.1 抛物反射面的形状精度的高要求

根据光学几何原理, 抛物面天线将焦点处的球面波转化成口面处的同相平面波. 因此, 抛物面的表面形状精度的降低会严重降低天线的增益, 增加旁瓣电平. 根据 Ruze 公式, 抛物面天线增益下降系数为<sup>[10]</sup>

$$\eta_r = e^{-\left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda}\right)^2}. \quad (3)$$

式中:  $\sigma$  为半光程差的均方根值.

由此可以看出, 反射面的效率  $\eta_r$  决定于均方根误差  $\sigma$  与波长  $\lambda$  的比值. 如果保持同样的效率, 波长较长的, 均方根误差可以允许大些, 波长短的, 允许的均方根误差小. 由公式可知, 随着  $\sigma$  的增大, 反射面的效率迅速降低. 一般要求  $\sigma$  为波长的  $1/30 \sim 1/60$ . 因此, 对适用于厘米波、毫米波的反射面天线, 公差要求非常严格.

### 3.2 充气抛物面的受力分析

抛物反射面的材料为聚酰亚胺等高聚物薄膜. 它们具有较高的玻璃化温度, 可以承受恶劣的太空热环境. 但是, 由于高聚物都具有粘弹性, 容易发生蠕变变形. 对于薄膜材料, 没有横向抗弯刚度, 只能承受面内拉力. 取抛物面的宽为  $dy$ , 厚为  $t$  的微曲面带  $OX_0$  进行受力分析 (见图 2).

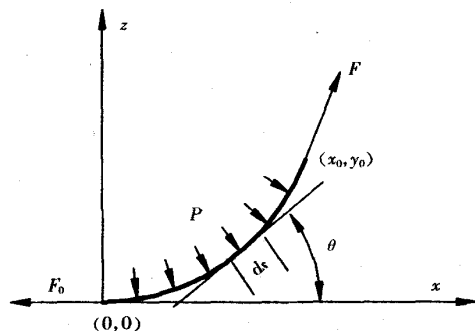


图2 充气抛物面受力分析

抛物面的方程为

$$x^2 = 4fz.$$

式中:  $f$  为焦距.

万方数据

其曲率

$$K = \frac{|z''|}{(1 + (z')^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{4f^2}{(x^2 + 4f^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

在  $z$  方向的力平衡为

$$\int_0^{x_0} p dy \cos \theta ds = F \sin \theta_0. \quad (3)$$

式中:  $p$  为气压;  $\theta$  为切线倾角.

曲线的切线斜率为

$$\tan \theta = z' = (1/2f)x.$$

带入式(3)得

$$\int_0^{x_0} p dy \frac{1}{\sqrt{1 + z'^2}} \sqrt{1 + z'^2} dx = t dy \sigma \frac{z'}{\sqrt{1 + z'^2}}.$$

式中:  $\sigma$  为薄膜面内的正应力.

点  $(x_0, y_0)$  处的正应力为

$$\sigma = (p/t) \sqrt{4f^2 + x_0^2}. \quad (4)$$

对于口径 1.5 m、焦距比为 0.8 和膜厚度为  $10 \mu\text{m}$  的抛物面, 假设其充气压力为 20 Pa, 可得其最小拉应力为 4.8 MPa. 而聚酰亚胺薄膜的弹性模量大约为 4 GPa, 抗拉强度大约为 150 MPa. 在此拉应力作用下, 材料的蠕变速率不可忽视.

## 4 编分形天线

目前, 分形理论主要用于手机天线. 一方面, 这主要由于分形理论能够显著缩小天线的体积, 适用手机天线的小型化设计要求. 据介绍, Koch 双极天线的高度比传统的直立双极天线降低 30%<sup>[11]</sup>, Koch 单极天线的高度比传统的线性单极天线降低 40%<sup>[12]</sup>. 若将这一优点反其道而用之, 就可以大大提高大型天线的效率. 另一方面, 这是由印刷天线的缺点决定的. 印刷天线的基体多为厚度很薄的高聚物材料, 其本身结构刚度低, 抗风暴等恶劣环境能力差, 不适合制作大型天线. 而在太空失重环境中这一缺点并不存在. 这说明, 可以进行大型太空分形天线的设计.

### 4.1 编分形天线的定义

通过印刷工艺, 将分形天线单元印制在太阳帆的帆面上, 实现线帆合一. 此种结构称为编分形天线.

### 4.2 编分形天线与抛物面充气天线性能对比

虽然充气抛物面天线为当前研究的热点, 但是它的两大关键技术——形状精度和寿命近期难以攻克. 在深空探测中, 编分形天线与充气抛物面天线相比, 具有精度要求更低、寿命更长、形式灵活多样并可实现多频段通信等优点.

#### 4.2.1 形状精度

空间充气抛物面天线主要由两种结构形式:

①反射面为可固化面 其面材料为预浸织物,在太空中通过紫外固化或热固化将其定型.但在固化过程中,由于树脂的流动和收缩使表面精度难以控制.并且由于面密度较高,不适合深空探测.

②反射面为充气结构 根据公式(4),抛物面母线上各点的应力是不相同的,因此各点的应变并不相同.这给制造过程中的精度控制带来很大的困难.其次,即使充气压力很小,膜内的拉应力也很大,材料的蠕变速率不可忽视.抛物面在工作过程中的变形也会大大降低形状精度.

而编分形天线,形状可随飞行器改变,结构灵活多样,面内精度要求不会高于太阳帆.同时,高聚物薄膜的蠕变对天线的效率影响不大.

#### 4.2.2 寿命与防护问题

虽然通过精心的设计和制造,充气抛物面天线的精度要求可能得到满足,并且在整个探测过程中,通过主动控制可以在一定程度上克服蠕变和微泄漏带来的消极影响,但是充气膜机构有一个致命的弱点,就是不能抵抗空间碎片或微流星体的冲击.一个微小的空洞将会使反射面内的气体全部泄漏,并且这一过程不可预测和控制,这不符合探测器的高可靠性要求.如果给反射面安置一防护罩,会增加飞行器重量,并且不能进行全面保护.

帆面的蠕变变形不会影响编分形天线的使用寿命.虽然编分形天线同样不能抵抗微流星体和空间碎片的冲击,但是细小的空洞至多损坏某几个天线单元,对天线效率的影响微乎其微.

#### 4.2.3 通信频段

抛物面天线只适合厘米波以下的波段.而编分形天线可以实现任何波段和多频段的通信,这使它成为下一代 - MIMO 天线的技术突破的关键.

#### 4.3 线帆合一的优点

线帆合一,不但能够结合太阳帆和分形天线各自的优点,还可以减轻编飞行器的质量,增加系统可靠性,这对深空探测具有重要意义.

##### 1) 减轻编飞行器的质量

在深空探测中,质量是一个非常关键的因素,它影响到发射成本、飞行距离和时间.将太阳帆和天线集成,能使探测器的质量大大减轻.尤其是太阳帆的推力只有  $9 \text{ N/km}^2$ ,其意义更加重大.线帆合一还会简化探测器的结构、降低制造成本.

##### 2) 增加系统的可靠性,备用天线

广阔的太阳帆帆面,可以安置数套同一用途

或不同用途的分形天线提高通信质量、抵御空间碎片的破坏和增加系统可靠性.

但是,线帆合一会影响到探测器的动力与通信的协调.从这方面考虑直升机式太阳帆比方形帆更适合做分形天线的载体.

## 5 结 论

本文提出了编分形天线的概念,将太阳帆与天线集成,将会成为深空探测器的动力和通信工具.编分形天线比抛物面充气天线更具优越性,更易开发.编分形天线的概念还可用于相控天线、合成孔径雷达、地面便携通信装置等方面.

## 参考文献:

- [1] WÜEST. A particle sensor for a multifunctional membrane solar sail spacecraft [J]. Advances in Space Research, 2004, 34: 219 - 223.
- [2] MCINNIS. Delivering fast and capable missions to the outer solar system [J]. Advances in Space Research, 2004, 34: 184 - 191.
- [3] KHAYATIAN B, RAHMAT-SAMII Y. A novel antenna concept for future solar sails: Application of Fresnel antennas [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2004, 46: 50 - 62.
- [4] CHRISTOPHER H M. Jenkins. Gossamer spacecraft: membrane and inflatable structures technology for space application [M]. Virginia: AIAA, 2000: 554 - 565.
- [5] FIESELER P D. A method for solar sailing in a low earth orbit [J]. Acta Astronautica, 1998, 43: 531 - 541.
- [6] 马克西莫夫. 宇宙飞行器研制的理论基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1980: 260 - 262.
- [7] MCGRAW-HILL. Encyclopedia of Science & Technology (Vol. 6) [M]. Beijing: Science Press, 1980: 205 - 206.
- [8] 周孝宽, 李学军. 图象的分形压缩方法 [J]. 宇航学报, 1995, 16: 13 - 18.
- [9] XU Liang, Michael Yan Wah Chia. Multiband characteristics of two fractal antennas [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1999, 23: 242 - 245.
- [10] 朱崇灿, 黄景熙. 天线 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1996: 299 - 305.
- [11] 屠振, 李明星. 分形天线的 IFS 实现与特性 [J]. 现代电子技术, 2004, 19: 32 - 34.
- [12] PUENTE C. Small but long Koch fractal monopole [J]. Electronics Letters, 1998, 34: 9 - 10.

(编辑 杨波)

## 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](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>