

# 考虑枕效应的网状可展开天线电性能预测

张树新, 李 鹏, 杨东武, 张逸群

(西安电子科技大学电子装备结构设计教育部重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 提出了一种预测网状可展开天线电性能的数值计算方法. 针对网状可展开天线采用三角形拼合的这一特点, 首先从结构力学出发确定天线枕效应变形, 然后采用巴斯卡图插值进行面片网格划分, 给出了网格划分准则, 其次通过最佳吻合抛物面确定最优馈源的位置和指向, 最后考虑丝网的电磁漏射对网状天线进行电性能预测. 通过仿真算例验证了该方法的可行性和有效性.

**关键词:** 网状可展开天线; 枕效应; 网格划分; 电性能

**中图分类号:** TN823 V443

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2014)07-1446-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.07.032

## EM Performance Prediction for Mesh Deployable Antennas Considering Pillow Deformation

ZHANG Shu-xin, LI Peng, YANG Dong-wu, ZHANG Yi-qun

(Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design (Ministry of Education), Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** A numerical method for electromagnetic (EM) performance prediction for mesh deployable antennas considering pillow deformation is proposed in this article. Accounting for the characteristics of mesh reflecting surface which is faceted by a series of triangles, the amount of pillow deformation is computed firstly based on the antenna structural parameters; Secondly, with the Pascal graph interpolation, the meshing of the surface facet is accomplished with a given criterion; The position and orientation of the optimized feed are both obtained using the traditional best-fit paraboloid (BFP) method; Finally, the EM performance is predicted under the influence of wire mesh leakage. Simulation results of a mesh deployable reflector validate the feasibility and effectiveness of the method.

**Key words:** mesh deployable reflector; pillow deformation; meshing; EM performance

## 1 引言

在未来先进的卫星通信、无线广播系统、地球观测、陆地遥感、深空探测和深空通信等领域, 可展开天线是必不可少的关键设备之一<sup>[1]</sup>. 由金属反射丝网作为反射面的网状可展开天线<sup>[2]</sup>是可展开天线的重要结构形式. 在几何结构上, 网状可展开天线通常采用一系列小三角形面片拼合而成<sup>[3]</sup>. 目前针对网状可展开天线的理论研究主要集中在索网形态分析<sup>[4]</sup>、展开过程控制<sup>[5]</sup>、电性能计算<sup>[6-8]</sup>、误差分析<sup>[9,10]</sup>、优化设计<sup>[11,12]</sup>等方面. 网状可展开天线与实体面天线的区别主要有丝网编织结构的电磁漏射、丝线接触不良引起的无源互调干扰和面片枕效应变形. 图1为 AstroMesh 网状可展开天线.

枕效应变形是网状可展开天线特有的变形现象, 它

发生在反射面弯曲的反方向, 使得反射面产生凸起. 枕效应带来的型面变形将影响天线的远场特性, 引起天线增益下降. 由于可展开天线采用平面或曲面面片逼近而成, 其自身设计即存在结构因素影响, 同时由于采用柔性的镀金钼丝网作为天线的反射面, 不可避免地带来枕效应与电磁漏射, 因此在电性能预测过程中需要对枕效应予以考虑.

文献[13]通过在口径面上进行矩形网格划分, 结合几何光学法对构架式可展开天线进行了方向图的快速计算, 其在分析中没有考虑丝网的漏射与天线的枕效应变形; 同时由于构成反射面的是一系列三角形, 采用矩形网格将在三角形边缘引入新的误差. 文献[14]采用换元物理光学法进行了构架式可展开天线方向图计算, 也没有考虑丝网的漏射与枕效应变形, 同时一些重

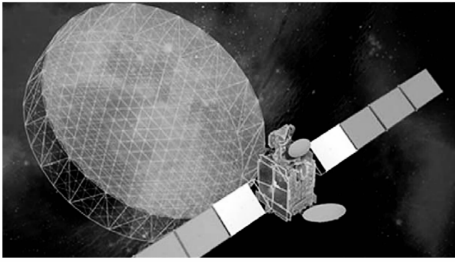


图1 AstroMesh网状可展开天线

要的参数在文献中没有进行说明.文献[6,7]针对丝网天线存在电磁漏射的这一情况,采用周期矩量法结合扩展的物理光学法分析了丝网天线的远场电性能,由于其在分析过程中没有考虑网状可展开天线的结构特性,其方法在分析具体形式的网状可展开天线,尤其是枕效应变形存在下的网状可展开天线时需要进行相应的改进.文献[8]建立了卫星和网状可展开天线的整体模型,在考虑丝网漏射的情况下进行了电性能预测,然而由于其建立的模型仅仅考虑了电磁性能,没有与反射面的变形信息进行联系,也就是无法预测实际工作环境下的电性能,因此由索拉力和丝网面片张力导致的枕效应变形也就无法进行分析评估.

本文采用巴斯卡图插值方法对三角形面片进行网格划分,避免了在划分网格过程中引入新的误差,并给出了网格划分准则.基于网状可展开天线的结构力学特点、面片的特征尺寸等参数,得到设计天线相对理想反射面的枕效应变形偏差;将网状可展开天线看做仰天工况下的地基天线,以反射面半光程差的均方根值为天线的精度指标,通过最佳吻合抛物面得到最优馈源的位置和指向;以物理光学法为基础在每个网格上进行高斯数值积分,然后叠加获得天线的远场特性.通过数值仿真,证明了该方法的可行性和有效性.

## 2 数值方法

### 2.1 枕效应

枕效应是网状可展开天线特有的变形模式,它发生在反射面弯曲(曲率)的反方向,使得反射面产生凸起.没有横向载荷的各向均匀受拉的丝网面必须具有零的平均曲率,如果一个方向的曲率是正的,则另一个方向上的曲率为负.网状可展开天线的反射面是由一系列边界支撑的丝网面片拼合构成的抛物面,这些面片将形成负高斯曲率的曲面.枕效应变形与索拉力、丝网面片张力、丝网面片大小和表面曲率有关.枕效应带来的误差与面片拼合的逼近误差同属于网状可展开天线的几何原理误差,该误差只能减小,而不可完全消除.

采用  $R_1$  和  $R_2$  表示丝网曲面的两个主曲率半径,

用  $N_1$  和  $N_2$  表示相切于表面的丝网面片张力.丝网面满足经典的薄膜理论,在表面无压差情况下有式(1)

$$\frac{N_1}{R_1} + \frac{N_2}{R_2} = 0 \quad (1)$$

其中,由于张力是各向均匀的,所以  $N_1 = N_2$ .丝网面的平均曲率为  $\mu = (1/2)(1/R_1 + 1/R_2)$ .曲面必须满足主曲率大小相等且反向,即形成  $\mu = 0$  的零平均曲率鞍面.曲面满足一定的边界条件,这样可以准确地确定曲面上任意点的变形.

假设正  $N$  边形面片,每个面片为边长  $l$ ,由周向的支撑索环绕固定;每个面片受到对称均匀的张力  $N_m$ ,每根索受到均匀拉力  $T_s$ .建立笛卡尔坐标系  $XOYZ$ ,坐标原点位于  $N$  边形面片的中心, $X$  轴垂直于一条支撑索, $Z$  轴垂直于平面向上,枕效应位移  $W$  沿  $Z$  方向为正.由于位移  $W$  是沿  $X$  轴旋转  $\pi/N$  成中心对称的,因此在分析中可以仅仅考虑多边形  $1/N$  部分以简化计算.图2为枕效应变形示意图<sup>[15]</sup>.

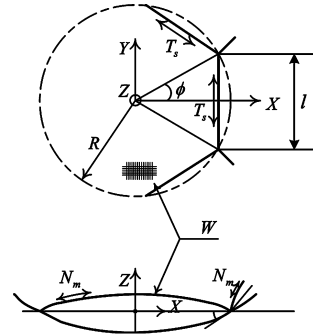


图2 枕效应变形示意图

### 2.2 网格划分

为了避免在网格划分中引入误差,本文采用巴斯卡图插值进行网格划分,在划分后的网格上进行高斯数值积分来得到天线的远场方向图.

以任意形状的三角形面片为例,设三角形的三个顶点分别为  $A(x_a, y_a, z_a)$ 、 $B(x_b, y_b, z_b)$ 、 $C(x_c, y_c, z_c)$ ,三点坐标构成矩阵  $\Omega^e$

$$\Omega^e = \begin{bmatrix} x_a & y_a & z_a \\ x_b & y_b & z_b \\ x_c & y_c & z_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

采用巴斯卡图插值进行网格细化,面片内的节点坐标有以下公式得到

$$\Omega^s = N_p \Omega^e \quad (3)$$

其中  $N_p$  为完全  $p$  次巴斯卡图插值矩阵,维数为  $n = (p + 1)(p + 2)/2$  行、3 列,矩阵  $\Omega^s$  为细分后的节点坐标,  $\Omega^s$  与  $N_p$  的维数相同.此时得到了二维口径面内的网格坐标,由于存在枕效应变形,故在  $Z$  方向上增加相应的枕效应变形量,即

$$\Omega_{n \times 3}^s = N_{p, n \times 3} \Omega_{3 \times 3}^s + [0 \ 0 \ W_{n \times 1}] \quad (4)$$

其中,  $W_{n \times 1}$  为对应节点的枕效应变形值组成的列向量。

对于  $p$  的取值, 根据网格大小和枕效应变形来决定, 一般取 10–15。图 3 为完全 3 次巴斯卡图插值得到的三角形网格, 数字代表节点编号。可以看出, 巴斯卡图插值是以三角形三个顶点与三条边为基准进行网格划分的, 其划分后的网格始终位于三角形内, 不会出现文献[13]矩形网格在三角形边缘的不匹配现象。

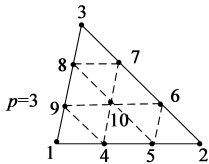


图3 三角形单元的巴斯卡图

### 2.3 馈源位置和指向的确定

网状可展开天线在设计中采用面片拼合结构, 其结构存在不可避免的几何误差(面片逼近误差和枕效应误差), 加上在制造过程中产生的随机误差和外载荷条件下的系统误差, 网状可展开天线的电性能分析必须与结构相结合, 即从“机电耦合”[16]的观点进行分析。所谓的“机电耦合”指的就是在天线设计中, 将结构-电磁两学科进行集成设计, 其研究主要体现在变形天线的电性能分析与集成设计[17, 18]上。由于网状可展开天线主体与馈源通过卫星相连, 而非地球站天线中的副面撑杆, 这就使得天线主体与馈源的关联性降低。因此针对天线的结构误差, 采用最佳吻合抛物面的方法来确定馈源的最优位置与指向。将网状可展开天线看做仰天工况下的地基地面天线, 以反射面半光程差的均方根值作为天线精度指标, 寻求最佳吻合精度下的天线吻合参数。最佳吻合精度[19]为

$$D_{ms} = \sqrt{(B - VH)^T Q (B - VH)} \quad (5)$$

其中,  $B$  为光程差正比向量,  $V$  为吻合几何阵,  $H = [\mu_o, \nu_o, w_o, h, \varphi_x, \varphi_y]$  为吻合参数向量,  $\mu_o, \nu_o, w_o$  分别为最佳吻合抛物面顶点相对原设计抛物面坐标系的位移分量,  $\varphi_x, \varphi_y$  为按右手螺旋定向的轴线转角,  $h$  为最佳吻合抛物面焦距的变化量。  $Q$  为加权阵, 故得到

$$H = (V^T Q V)^{-1} V Q B \quad (6)$$

$H$  是  $B$  关于  $Q$  加权的最佳吻合面吻合参数。通过吻合参数得到天线的最优馈源位置及指向。

### 2.4 丝网漏射分析

针对丝网存在漏射的问题, 文献[6, 7]在物理光学法的基础上, 通过将实体面电流中增加电流修正项, 对不同编织结构的丝网反射面进行电性能分析, 计算公式[6, 7]如下

$$E(\theta, \varphi) = -jk\eta \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} (\bar{I} - \hat{\hat{r}}) \cdot T \quad (7)$$

$$T(\theta, \varphi) = \int_{\Sigma} \mathbf{J}(\mathbf{r}') e^{j\hat{r} \cdot \mathbf{r}'} d\mathbf{s} \quad (8)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}') = 2\hat{n} \times \mathbf{H}^{inc}(\mathbf{r}') + \mathbf{J}_m \quad (9)$$

其中,  $j = \sqrt{-1}$ ,  $k = 2\pi/\lambda$  为自由空间波数,  $\lambda$  为波长,  $\eta = 120\pi$  是自由空间波阻抗,  $\bar{I}$  为单位并矢,  $\hat{\hat{r}}$  为单位矢量  $\hat{r}$  的并矢,  $\mathbf{J}_m$  是由网孔能量泄漏形成的修正项。  $\mathbf{J}_m$  与工作频率、丝网的编织结构、入射磁场和丝网局部坐标系下的入射角有关,  $\mathbf{J}_m$  的计算与文献[6, 7]保持一致。

假设丝网结构具有良好的电接触, 没有无源互调杂波的影响, 相邻面片之间的连接点仅位于一个面片上, 电流在连接点上不存在扰动和不连续, 曲面的法向矢量由面片公式得到。以网格划分为基础, 在每个小三角形上进行高斯数值积分[20], 叠加所有网格产生的场便得到天线远场特性。

$$E(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^M \mathbf{E}_i \quad (10)$$

其中,  $M$  为所有三角形个数,  $\mathbf{E}_i$  为在第  $i$  个三角形网格上数值积分得到的场值。

### 2.5 分析流程

以上述数值方法为基础, 编写了网状可展开天线电性能计算程序, 该计算程序能够同时考虑丝网漏射与枕效应变形, 实现网状可展开天线远场方向图的计算。程序的主要工作流程如图 4 所示。在程序计算之前需要已知的参数为: 反射面的口径、焦距、工作频率、馈源初级方向图、丝网结构参数、三角形面片的尺寸、索拉力、丝网面片张力等。程序输出的结果包含天线远场方向图、增益、副瓣等信息。

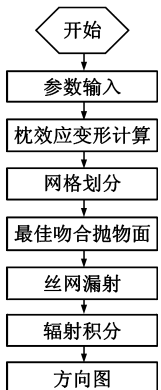


图4 分析流程

## 3 仿真算例

为了验证程序的适用性与有效性, 本文安排了两个仿真算例, 一是仅考虑丝网漏射理想反射面天线方向图计算, 二是同时考虑丝网漏射与枕效应的网状可展开天线电性能计算。

### (1) 丝网反射面天线电性能仿真

首先对理想丝网反射面天线进行电性能预测, 以此验证方法的可行性与有效性。以文献[6, 7]的偏置抛物面为例(如图 5 所示), 反射面口径 0.6m, 焦距 0.4m, 偏置高度 0.4m, 馈源倾斜角为  $\psi_0 = 48.31$  度, 工作频率为 20GHz。馈源采用 Cosine-Q 类型, 选择右旋圆极化激励方式, 边缘锥削为 -18dB, 馈源参数为  $Q_x = Q_y = 11.01$ 。丝网采用简单编织结构的 wire-grid[6]单元(如图 6 所示), 单元参数为横向间距  $a$ , 纵向间距  $b$  和丝网横

截面半径  $r_0$ . 在计算中选取两种丝网结构参数, 即  $a = 0.02\lambda$ 、 $b = 0.04\lambda$ 、 $r_0 = 0.001\lambda$  和  $a = 0.02\lambda$ 、 $b = 0.04\lambda$ 、 $r_0 = 0.001\lambda$  ( $\lambda$  为工作波长).

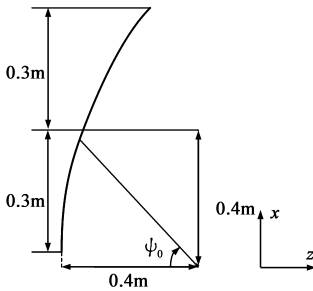


图5 偏置反射面示意图

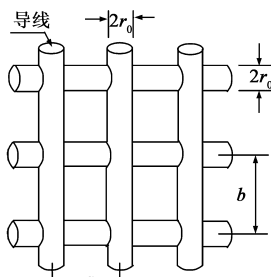


图6 丝网wire-grid单元

在本仿真中, 仅仅计算丝网漏射情况下的理想反射面天线远场方向图并与文献[6]进行对比. 图7为仿真得到的  $xz$  面远场方向图, 其中虚线表示  $a = 0.02\lambda$ 、 $b = 0.04\lambda$  的丝网反射面、点线表示  $a = 0.02\lambda$ 、 $b = 0.04\lambda$  的丝网反射面、实线表示实体反射面. 从图中可以看出丝网结构对于远场交叉极化方向图影响较大, 导致交叉极化电平上升, 对主极化方向图几乎没有影响. 由于文献[6]没有公开具体的远场参数, 因此将仿真得到的实体反射面远场参数与文献[6,7]进行了对比(表1). 通过对比本文仿真结果与文献[6]和表1可以看出, 本文结果与文献[6,7]差别较小, 从而证明了该程序的有效性.

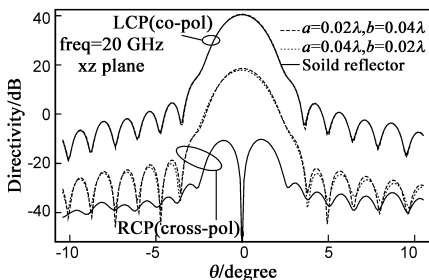


图7  $xz$ 面远场方向图

## (2) 网状可展开天线电性能仿真

采用文献[21]的圆对称反射面天线, 口径为  $D = 48\lambda$ , 焦距  $F = 48.13\lambda$ , 工作频率设定为 3GHz, 馈源采用

Cosine-Q 类型, 选择  $y$  方向线极化激励方式, 馈源参数为  $Q_x = Q_y = 17.1094$ . 丝网采用简单编织结构的 wire-grid<sup>[6]</sup>单元(如图6所示), 单元参数为横向间距  $a = 0.04\lambda$ 、纵向间距  $b = 0.04\lambda$  和丝网横截面半径  $r_0 = 0.001\lambda$ . 丝网面片张力为  $N_m = 50\text{N/m}$ , 索拉力为  $T_s = 10\text{N}$ . 根据天线的工作频段和反射面结构力学特点, 将反射面进行面片拼合, 在投影口径面上沿半径等分4段, 去掉边缘不规则三角形, 得到投影口径为正六边形的拼合反射面, 如图8所示. 正三角形边长  $l = 6\lambda = 0.6\text{m}$ , 采用完全10次巴斯卡图进行网格划分, 此时不考虑枕效应时的轴向均方根误差(面片逼近误差)RMS<sup>[22]</sup>为

$$\delta_{rms,z} = \frac{1}{16\sqrt{15}} \frac{l^2}{F} = 1.207\text{mm} \quad (11)$$

面片张力为  $N_m = 50\text{N/m}$ , 索拉力为  $T_s = 10\text{N}$  时的轴向均方根误差 RMS<sup>[23]</sup>为

$$\delta_{rms,z} = \frac{1}{16\sqrt{15}} \frac{l^2}{F} \left( 1 + 0.33 \frac{N_m l}{T_s} \right) = 2.402\text{mm} \quad (12)$$

表1 实体反射面  $xz$  面远场参数比较

单位: dB	最大方向系数	交叉极化鉴别率(XPD)
本文仿真	40.4245	50.7177
文献[7]	40.42	50.98
误差	-0.0045	0.2623

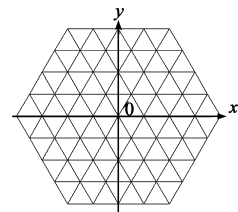


图8 网状可展开天线反射面俯视图

图9为仿真得到的反射面  $yz$  面远场方向图, 图10为主轴方向上的局部放大图. 其中实线表示理想反射面、虚线表示无枕效应变形的网状反射面、点划线表示考虑枕效应变形的网状反射面、点线表示同时考虑枕效应变形与丝网电磁漏射的网状反射面. 表2为主要远场电参数. 比较理想反射面远场方向图与无枕效应时的网状反射面远场方向图可以看出, 面片拼合误差将导致反射面增益下降, 副瓣电平上升, 波瓣变宽, 如表2所示, 天线最大方向系数由 42.14dB 下降到 41.51dB, 半功率波瓣宽度由 1.4 度增大到 1.57 度; 比较考虑枕效应变形的远场方向图可以看出, 枕效应变形引起天线增益进一步下降(天线最大方向系数由 41.51dB 下降到 41.20dB), 其对副瓣电平和波瓣宽度的影响较小; 比较考虑丝网漏射时的远场方向图可以看出, 丝网结构导

致远场方向图零深上升,其对增益影响较小(天线最大方向系数仅下降了 0.04dB).

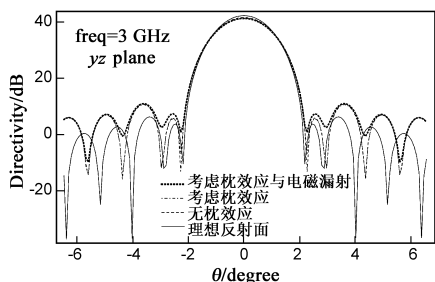


图9 网状可展开天线yz面远场方向图

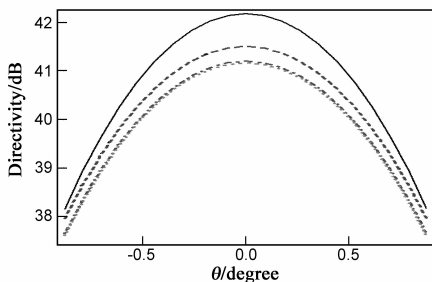


图10 局部放大图

表 2 远场方向图主要电参数

	最大方向系数/dB	半功率波瓣宽度/°
理想反射面	42.14	1.4
无枕效应	41.51	1.57
考虑枕效应	41.20	1.57
考虑枕效应与电磁漏射	41.16	1.57

## 4 结论

(1) 针对网状可展开天线中存在枕效应变形这一现象,本文提出了一种预测网状可展开天线远场方向图的数值计算方法.该方法在实施过程中,采用了巴斯卡图插值进行网格划分,通过最佳吻合抛物面确定最优馈源的位置和指向,根据该方法可以实现包含枕效应变形和丝网电磁漏射在内的网状可展开天线电性能预测.仿真结果验证了该方法的有效性.

(2) 通过数值仿真结果可以看到,面片拼合误差将引起天线增益下降,副瓣电平上升,波瓣变宽;同时网状天线的枕效应变形也将引起天线增益下降;丝网结构对天线主极化方向图影响较小,对交叉极化电平影响较大,丝网结构将带来交叉极化电平上升.

(3) 在网状可展开天线的设计中,应当尽可能减少面片拼合误差和枕效应变形,即适当地减小面片尺寸,选择合适的面片张力与索拉力;同时选择合适的丝网

编织结构,以降低交叉极化电平.

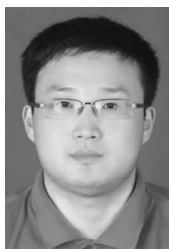
下一步的工作是进行网状可展开天线的机电集成设计,以指导工程实践.

## 参考文献

- [1] D Entekhabi, E G Njoku, P E O' Neill, et al. The soil moisture active passive(SMAP) mission [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5): 704 – 716.
- [2] O S Alvarez-Salazar, D Adams, M Milman, et al. Pointing architecture of SMAP's large spinning antenna [A]. Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control(GNC) Conference [C]. Boston, MA, USA: AIAA, 2013. 1 – 19.
- [3] D Yang, S Zhang, T Li, et al. Preliminary design of paraboloidal reflectors with flat facets [J]. Acta Astronautica, 2013, 89(3): 14 – 20.
- [4] S Morterolle, B Maurin, J Quirant, C Dupuy. Numerical form-finding of geotensoid tension truss for mesh reflector [J]. Acta Astronautica, 2012, 76(2): 154 – 163.
- [5] A Meguro, K Shintateb, M Usuib, et al. In-orbit deployment characteristics of large deployable antenna reflector onboard Engineering Test Satellite VIII [J]. Acta Astronautica, 2009, 65(9 – 10): 1306 – 1316.
- [6] A Miura, Y Rahmat-Samii. Analysis of mesh reflector antennas with complex mesh surfaces using physical optics combined with periodic method of moments [A]. Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference [C]. Suzhou, China: IEEE, 2005. 1 – 10.
- [7] A Miura, Y Rahmat-Samii. Spaceborne mesh reflector antennas with complex weaves; extended PO/periodic-MoM analysis [J]. IEEE Transactions on Antennas and propagation, 2007, 55(4): 1022 – 1029.
- [8] P Focardi, P Brown, Y Rahmat-Samii. A 6-m mesh reflector antenna for SMAP: modeling the RF performance of a challenging Earth-orbiting instrument [A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation(APSURSI) [C]. Spokane, WA: IEEE, 2011. 2987 – 2990.
- [9] K Bahadori, Y Rahmat-samii. Characterization of effects of periodic and aperiodic surface distortions on membrane reflector antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and propagation, 2005, 53(9): 2782 – 2791.
- [10] H Rajagopalan, S Xu, Y Rahmat-Samii. Experimental demonstration of reflectarrays acting as conic section subreflectors in a dual reflector system [J]. IEEE Transactions on Antennas and propagation, 2013, 61(11): 5475 – 5484.
- [11] 王从思, 段宝岩, 郑飞, 仇原鹰. 大型空间桁架面天线的结构 – 电磁耦合优化设计 [J]. 电子学报, 2008, 36(9): 1776 – 1781.

- Mechatronic optimization design and analysis of large space parabolic antennas with active truss support structures [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(9): 1776 – 1781. (in Chinese)
- [12] 李鹏, 郑飞, 段宝岩. 考虑馈源位置误差的面天线机电耦合优化设计[J]. *电子学报*, 2010, 38(6): 1377 – 1382.  
Li Peng, Zheng Fei, Duan Bao-yan. Electromechanical coupling optimization design of reflector antennas including feed position error [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(6): 1377 – 1382. (in Chinese)
- [13] 寿建军, 关富玲. 星载可展构架式天线方向图快速计算[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(5): 828 – 833.  
Shou Jian-jun, Guan Fu-ling. Fast pattern simulation of deployable truss antenna on satellite [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(5): 828 – 833. (in Chinese)
- [14] 王乐, 高文军, 雷宏等. 采用换元物理光学法分析桁架式可展开反射面天线方向图[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(6): 1484 – 1489.  
Wang Le, Gao Wen-jun, Lei Hong, et al. Analysis for the pattern of deployable truss reflector antenna with substitute physical optics method [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2013, 35(6): 1484 – 1489. (in Chinese)
- [15] K Tanizawa, J Nishimura. Pillow deformation of a mesh reflector [J]. *Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 1996, 44(508): 291 – 297. (in Japanese)
- [16] B Y Duan, C S Wang. Reflector antenna distortion analysis using MEFCM [J]. *IEEE Transactions on Antennas and propagation*, 2009, 57(10): 3409 – 3413.
- [17] 王从思, 段宝岩. 反射面天线机电场耦合关系式及其应用[J]. *电子学报*, 2011, 39(6): 1431 – 1435.  
Wang Cong-si, Duan Bao-yan. On development and application of mechanical-electromagnetic-field coupling model of reflector antennas [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(6): 1431 – 1435. (in Chinese)
- [18] 段宝岩, 王猛. 微波天线多场耦合理论模型与多学科优化设计的研究[J]. *电子学报*, 2013, 41(10): 2051 – 2060.  
Duan Bao-yan, Wang Meng. Research of the theoretical model of multi-field coupling and multidisciplinary optimization design on microwave antennas [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(10): 2051 – 2060. (in Chinese)
- [19] 朱钟淦, 叶尚辉. 天线结构设计北京[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [20] 李鹏, 郑飞, 季祥. 大型宽带反射面天线的机电耦合分析[J]. *西安电子科技大学学报*, 2009, 38(3): 473 – 479.  
Li Peng, Zheng Fei, Ji Xiang. Electromechanical coupled analysis of large broad band reflector antennas [J]. *Journal of Xidian University*, 2009, 38(3): 473 – 479. (in Chinese)
- [21] S Zhang, B Duan, H Bao, et al. Sensitivity analysis of reflector antennas and its application on shaped geo-truss unfurlable antennas [J]. *IEEE Transactions on Antennas and propagation*, 2013, 61(11): 5402 – 5407.
- [22] P K Agrawal, M S Anderson, M F Card. Preliminary design of large reflectors with flat facets [J]. *IEEE Transactions on Antennas and propagation*, 1981, 29(4): 688 – 694.
- [23] J M Hedgepeth. Accuracy potentials for large space antenna reflectors with passive structure [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1982, 19(3): 211 – 217.

### 作者简介



张树新 男, 1987年3月出生, 河北深州人. 2010年本科毕业于西安电子科技大学机械设计制造及其自动化专业. 现为西安电子科技大学博士研究生, IET 学生会员, IEEE 学生会员. 主要从事反射面天线误差分析研究.  
E-mail: zhangshuxindd@126.com



李鹏 男, 1981年出生, 湖北宜昌人. 博士、副教授、IET 会员. 2010年在西安电子科技大学获工学博士学位. 主要从事电子装备多场耦合分析与设计等方面的研究工作.  
E-mail: yinhong0523@163.com

杨东武 男, 1978年11月出生, 陕西韩城人. 博士、副教授、硕士生导师. 主要从事星载可展开天线结构分析与设计, 反射面天线结构设计等方面的研究工作.  
E-mail: ydw\_1978@126.com

张逸群 男, 1984年8月出生, 陕西西安人. 博士, 讲师, IET 会员. 2013年在西安电子科技大学获工学博士学位. 主要从事星载可展开天线机构设计与控制等方面的研究工作.  
E-mail: yiqunzhang@xidian.edu.cn