0254-6124/2011/31(5)-687–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Shou Jianjun, Xu Yan, Guan Fuling. Electro-magnetic performance research on tetrahedron truss antenna. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(5): 687-692

构架式可展天线电性能研究

寿建军[1,2] 徐 彦[3] 关富玲[3]

1(电联工程技术有限公司 杭州 310016)

2(浙江八达建设集团有限公司 杭州 310002)

3(浙江大学空间结构研究中心 杭州 310058)

摘 要 提出了一种构架单元式的展开桁架天线. 对构架式可展天线的电性能进行了研究, 以确定较优的设计参数和结构方案. 针对可展反射面形态的具体特点, 基于几何光学原理, 推导了可展天线远场的电场强度公式, 将口径面划分成矩形网格, 用数值方法对远场场强进行积分, 得到天线反射面的方向图. 进而编制相应程序, 用于分析不同设计参数的构架式天线反射面的电性能. 该方法直接将结构变形与天线电性能相联系, 避免了通过均方根换算带来的额外误差, 使得设计更准确. 此方法同样适用于标准抛物面或者任何已知缺陷反射面的辐射场计算.

关键词 构架式可展天线, 电性能, 方向图, 参数优化

中图法分类号 V 414

Electro-magnetic Performance Research on Tetrahedron Truss Antenna

SHOU Jianjun[1,2] XU Yan[3] GUAN Fuling[3]

1(*DY-Link Engineering and Technologies Company Limited, Hangzhou* 310016)

2(*Zhejiang Bada Construction Group Company Limited, Hangzhou* 310002)

3(*College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou* 310058)

Abstract Large deployable truss antennas have extensive applications in communication satellites and space stations. This paper deals with a kind of deployable truss antenna that consists of tetrahedral modules. Electro-magnetic performance of tetrahedron truss deployable antenna is researched, to optimize design parameter and structure precept. According to the features of the deployable reflector configuration and the geometry optical theory, the computing arithmetic of the electro-field intensity of the tetrahedron truss antenna is formulized. Then the paraboloid reflector is separated to form rectangular grid on the aperture plane and the integral of the far-field is conducted with the analytical method. Finally far-field pattern of antenna reflector is obtained. The corresponding program is designed and used to analyze far-field pattern of truss antenna with different design parameter. This method directly related the structure with the electro-magnetic field, which improves

2011-01-23 收到原稿, 2011-06-20 收到修定稿

E-mail: shoujj70@163.com

the design by leaving out the RMS value. So the design process is more accurate. This program can be applied to analyze the reflector radiation field of standard reflector or any reflector which distortion is already described.

Key words Tetrahedron truss antenna, Electro-magnetic performance, Far-field pattern, Parameter optimize

1 引言

空间可展天线目前广泛应用于各类工程试验卫星和应用卫星. 对地观测、天基雷达和移动卫星通信等对大口径和超大口径空间可展天线提出需求. 构架式可展天线由于具有收缩体积小、刚度高及形状构造灵活等优点, 非常适合于小卫星 SAR 天线.

构架式可展天线的结构性能已经得到广泛研究 [1−3], 但是关于此类天线的电性能研究还很少. Rahmat-Samii 等 [4−5] 对圆口径抛物面天线的方向图进行了大量的研究, 由于反射面尺寸远大于天线工作波长, 多采用几何光学方法. 关富玲 [6] 分析了天线结构在正对称变形和反对称变形下的方向图. Cherrette[7−8] 等利用口径面划分网格的方式, 假定网格充分小时其幅值为恒值, 进而计算远场.

抛物面天线辐射场的近似分析方法一般有两种, 即表面电流法和口径场法, 本文以口径场法和几何光学为基础提出一种新算法, 采用数值分析法与解析法相结合的方式计算远场. 首先将反射面离散使其口径面呈矩形网格, 在网格内采用分离变量的办法求出近似的解析解, 然后叠加所有网格求出远场.

本算法基于的口径面法在抛物面天线方向图的主瓣和近轴副瓣区域可以得到比较精确的结果, 而且是在平面上积分, 计算变得较为简捷. 本算法在每个网格内利用更精确的二次项而不是恒值计算光程差, 既避免了复杂的解析推导, 同时省去了非常耗时的数值积分.

2 反射面天线电磁场

根据电磁场基本理论, 由反射面表面电流 $\boldsymbol{J}$ 产生的远场电场强度为 [6]

$$\boldsymbol{E} = -\mathrm{j}\frac{\omega\mu}{4\pi}\int_s \frac{\boldsymbol{J}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}kR}}{R}\mathrm{d}s. \tag{1}$$

其中, k 为电磁波的传播常数, 满足 $k^2 = \omega^2\mu\varepsilon$, 这里 ε 为介电常数; μ 为导磁率; R 为源点到观测点的距离; $\boldsymbol{J}$ 为反射面表面电流密度.

图 1 为从焦点出发的电磁波束的光程, 对 R 进行二次式展开, 分母上的 R 作零级近似, 对指数上的 R 作一级近似, 代入式 (1) 并忽略分母中的高阶小量, 得到

$$\boldsymbol{E}(\theta,\varphi) = -\mathrm{j}\frac{\omega\mu}{4\pi}\cdot \int_s \frac{\boldsymbol{J}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k(|r|-x'\sin\theta\cos\varphi+y'\sin\theta\sin\varphi+z'\cos\theta)}}{|r|}\mathrm{d}s. \tag{2}$$

把反射面的曲面积分转换成平面积分, 得到

$$\boldsymbol{E}(u,\nu) = -\mathrm{j}\frac{\omega\mu}{4\pi|r|}\cdot \iint_s \boldsymbol{J}\cdot J_s\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k|r|}\mathrm{e}^{\mathrm{j}k(x'u+y'\nu+z'\cos\theta)}\mathrm{d}x'\mathrm{d}y'. \tag{3}$$

式中,

$$J_s = \sqrt{1+(\partial z'/\partial x')^2+(\partial z'/\partial y')^2},$$
$$u = \sin\theta\cos\varphi,$$
$$\nu = \sin\theta\sin\varphi.$$

假定反射体为理想导体, 口径面上点的场强与反射面上对应点的场强相同, 反射前后相位相差 π. 口

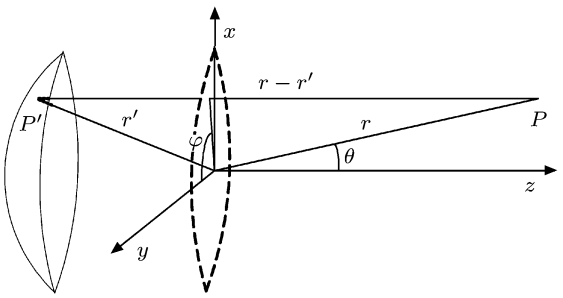


图 1 从焦点出发的电磁波束光程示意

Fig. 1 Diagram of the electromagnetic beam optic path

径面上点的场强为

$$\boldsymbol{E}(u,\nu)=\mathrm{j}\frac{\omega\mu\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k|r|}}{4\pi|r|}\cdot \iint_s \frac{\boldsymbol{J}_0 J_s \mathrm{e}^{-\mathrm{j}k\rho}\mathrm{e}^{\mathrm{j}k(x'u+y'\nu+z'\cos\theta)}}{\rho}\mathrm{d}x'\mathrm{d}y'. \quad (4)$$

式中, ρ 为馈源的相位中心位于焦点时馈源到反射面的相位.

3 天线方向图数值方法

天线的方向性指在给定距离时, 天线的辐射强度随辐射角的变化而不同. 天线的方向性可用方向图来表示. 方向性函数定义为

$$F(u,\nu)=\frac{|E(u,\nu)|}{|E_{\max}|}. \quad (5)$$

将式 (4) 代入式 (5), 得到的积分式非常复杂. 针对构架式可展天线反射面特有的形状, 提出新的数值方法. 将每个三角形单元在口径面上的投影划分成矩形网格, 图 2 中 $\triangle ABC$ 为构架式反射面中的一个单元及其在口径面上的投影, 图 3 为该投影面上的网格划分. 如此划分网格主要是为了简化积分区间, 以便于对式 (5) 中积分进行变量分离, 先把积分用解析法解出, 然后计算辐射场, 这样极大地提高了计算速度. 但是带来的问题是积分区域与原区域在一定程度上存在误差, 相应解决的办法是使网格充分小以减小误差.

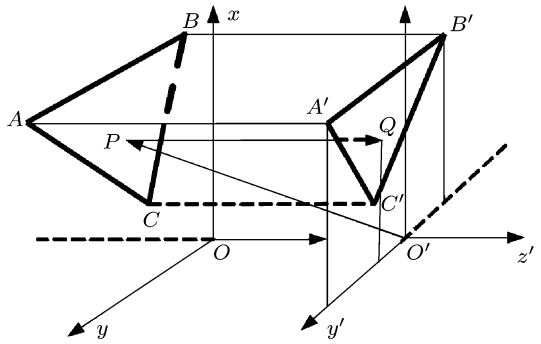


图 2 三角形反射面及口径

Fig. 2 Triangle reflector and aperture

式 (4) 转变为式 (6), 有

$$\boldsymbol{E}(u,\nu)=A_0\sum_{n=1}^{N}\sum_{i=1}^{K_n}\left|\frac{J_s(x',y')}{\rho}\right|F_{n,i}. \quad (6)$$

式中, N 为三角形单元数, K_n 为每个单元划分的网格数,

$$A_0=-\mathrm{j}\frac{\omega\mu}{4\pi|r|},$$

$$J_s(x',y')=\boldsymbol{J}\cdot J_s,$$

$$F_{n,i}=\int_{s_i}\mathrm{e}^{\mathrm{j}kL_i}\mathrm{d}x\mathrm{d}y,$$

$$L_i=ux'+\nu y'-(|\rho|-z'\cos\theta),$$

$$\rho=[x'^2+y'^2+z'^2]^{\frac{1}{2}}.$$

z' 满足平面方程

$$\begin{vmatrix} x' & y' & z' & 1\\ x'_1 & y'_1 & z'_1 & 1\\ x'_2 & y'_2 & z'_2 & 1\\ x'_3 & y'_3 & z'_3 & 1 \end{vmatrix}=0. \quad (7)$$

式中, x'_i, y'_i, z'_i $(i=1,2,3)$ 为每个单元的三个顶点坐标.

对积分函数 $F_{n,i}$ 用分离变量法, 有

$$F_{n,i}=\mathrm{e}^{\mathrm{j}kR_1}\int_{-m/2}^{m/2}\mathrm{e}^{\mathrm{j}k(R_2x'+R_4x'^2)}\mathrm{d}x\cdot \int_{-h/2}^{h/2}\mathrm{e}^{\mathrm{j}k(R_3y'+R_5y'^2)}\mathrm{d}y=\mathrm{e}^{\mathrm{j}kR_1}F^x_{n,i}F^y_{n,i}. \quad (8)$$

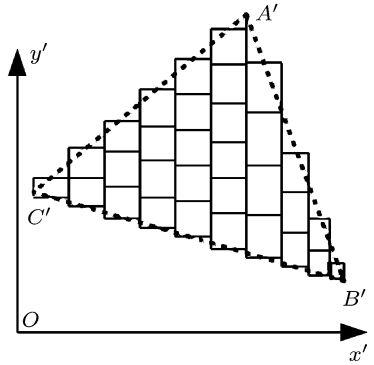


图 3 三角形单元网格划分

Fig. 3 Triangular element grid division

对式 (8) 中的 $F_{n,i}^{x}$ 和 $F_{n,i}^{y}$ 可以利用菲涅耳积分法 [9] 求解, 即

$$F_{n,i}^{x}=\sqrt{\frac{-\pi}{2kR_4}}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}kR_2^2/(4R_4)}\cdot \{[C(u_x)-C(\nu_x)]-\mathrm{j}\,[S(u_x)-S(\nu_x)]\}, \tag{9}$$

$$F_{n,i}^{y}=\sqrt{\frac{-\pi}{2kR_5}}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}kR_3^2/(4R_5)}\cdot \{[C(u_y)-C(\nu_y)]-\mathrm{j}\,[S(u_y)-S(\nu_y)]\}. \tag{10}$$

其中,

$$u_x=-R_2\sqrt{\frac{-k}{2\pi R_4}}+\frac{m}{2}\sqrt{\frac{-kR_4}{2\pi}},$$

$$\nu_x=\frac{-R_2}{2\pi}\sqrt{\frac{-2k\pi}{R_4}}-\frac{m}{2}\sqrt{\frac{-kR_4}{2\pi}},$$

$$u_y=-R_3\sqrt{\frac{-k}{2\pi R_5}}+\frac{h}{2}\sqrt{\frac{-kR_5}{2\pi}},$$

$$\nu_y=\frac{-R_3}{2\pi}\sqrt{\frac{-2k\pi}{R_5}}-\frac{h}{2}\sqrt{\frac{-kR_5}{2\pi}}.$$

4 构架式天线方向图设计

设计一口径为 6 m × 6 m 的构架式天线, 抛物面焦距为 2 m. 馈源置于口径为圆形的理想抛物面焦点处, 馈源发射电磁波在抛物面产生的表面电流分布为

$$|J(x',y')|=B+C\big[1-(x'^2+y'^2)/a^2\big]. \tag{11}$$

解析条件:

$$f=2.281\,\mathrm{GHz},\quad \lambda=131.5\,\mathrm{mm},$$

$$a/\lambda=50,\quad F/a=1.4,\quad D=2a.$$

其中, 系数 $B+C=1$, $20\lg B=-10\,\mathrm{dB}$, a 为圆形抛物面天线口径的半径; F 为抛物面焦距; D 为口径直径.

构架式可展开天线单元杆长不同, 反射面型面与理想抛物面的偏差也不同, 杆越短则偏差越小. 但是对于相同口径的天线, 如果杆件数越多, 卫星入轨后天线展开越不可靠. 因此寻找合适的单元杆长是构架式天线设计的关键, 根据上述推导的算法可以编制相应程序计算天线方向图, 研究三角单元杆长对天线电性能的影响.

设计步骤如下.

(1) 初步预定杆长及拓扑层数. 根据口径、焦距以及应该达到的均方根误差, 来预先假定杆长及拓扑层数, 有

$$L=\sqrt{\delta_{\mathrm{rms}}\times 8\sqrt{15}\Big(2F+\frac{D^2}{32F}\Big)}. \tag{12}$$

(2) 计算方向图. 确定了基本拓扑结构后, 应用数值算法编制的程序计算天线方向图.

(3) 调整天线设计方案. 根据方向图中反映的辐射特性结合可展开天线固有的特性, 包括制造安装的复杂程度、天线自重、展开可靠性等要求, 调整初始设计的杆长和拓扑层数.

(4) 校核该天线的电性能, 以确定该方案是否满足要求.

天线拓扑结构的初步设计具体方法可以参考文献 [10], 具体拓扑模型如图 4. 不同弦杆长度下的方向图如图 5 所示.

从计算结果可以看出, 理想抛物面的主瓣增益比三角平面反射面高, 且弦杆长度越短, 两个方向图越接近.

表 1 列出了 7 种不同弦杆长度下天线的相关参数. 表 1 中单元拓扑层数指的是沿 x 或 y 轴方向, 从天线中心到口径上四面体单元的层数; 口径指的是构架天线实际口径大小, 当设定了天线的设计口径后, 在单元拓扑的过程中实际口径接近设计值后, 如果再增加一层, 口径会超过设计值, 此时拓扑停止, 所以每种杆长下实际口径并不相同. 表 1 还分别给出了理想抛物面和三角形拟合面的半功率宽和旁瓣电平.

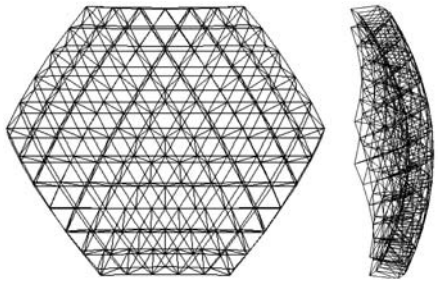


图 4 天线拓扑模型

Fig. 4 Antenna topology model diagram

表 1　不同弦杆长度下的相关参数

Table 1　Parameters under different chord length

杆长/mm	单元拓扑层数	口径/m	RMS/mm	理想抛物面		三角形拟合面	
				半功率宽/(°)	旁瓣电平/(dB)	半功率宽/(°)	旁瓣电平/(dB)
403	9	5.8427	0.8803	1.6043	−18.0168	1.6043	−17.7821
497	7	5.6216	1.3444	1.6043	−18.3209	1.6043	−17.8121
577	6	5.5745	1.7975	1.6043	−18.3796	1.6043	−17.5256
650	5	5.2646	2.3024	1.7189	−18.7831	1.7189	−17.5695
716	5	5.663	2.6693	1.6043	−18.2853	1.6043	−16.4299
777	5	6.0141	3.0145	1.4897	−17.8298	1.4897	−15.2750
835	4	5.3114	3.6571	1.7189	−18.7481	1.7189	−15.9190

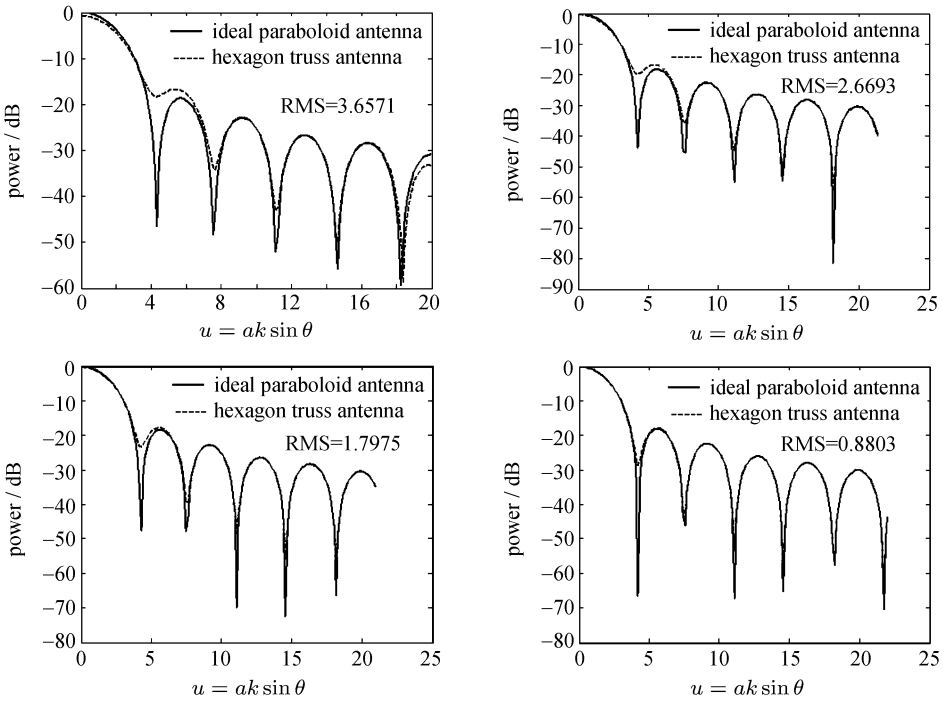


图 5　不同弦杆长度下三角平面和理想抛物面方向图

Fig. 5　Far-field patterns of the triangle flat and the ideal paraboloid of different chord length

从表 1 可以看出, 弦杆长度一定时, 理想抛物面和三角形拟合面的方向图中半功率宽相同; 两种反射面的半功率宽随口径面的变化而变化, 口径面越大半功率宽越小, 表示天线的主瓣越窄, 方向性越好.

以上分析了天线的辐射特性与弦杆长度的关系, 总的趋势是杆长越短, 得到的电性能越好. 然而设计构架式天线还必须考虑机构的复杂性, 这不但关系到反射成本, 还因为越复杂的结构往往可靠度越低, 所以设计此类天线时要综合考虑这两个因素. 当杆长为 650 mm 时, 旁瓣电平相对较高, 拓扑层数仅为 5 层, 结构简单, 展开也较为可靠.

5　结语

针对构架式可展反射面的形态特点, 基于几何光学原理, 推导了天线远场的电场强度, 通过把口径面

划分成矩形网格, 用解析方法对远场进行积分, 从而直接根据天线拓扑形状计算出其远场的电性能.

根据本文推导的公式编制程序, 可以快捷地计算出构架式天线远场的场强, 因此对研究杆件长度变化带来的相应电性能变化提供了直接、可靠的方法. 经过对一个天线实例的研究和计算, 可以迅速找到在给定口径和焦距条件下天线杆件的最佳单元长度. 此方法还适用于标准抛物面或任何已知缺陷的反射面的辐射场计算.

构架式展开天线偏置抛物面的辐射场分析和空域极化特性, 特别是偏置角对天线远场特性的影响有待进一步研究.

参考文献

[1] Miura K, Furuya H. Variable geometry truss and space crane arm [J]. *Acta Astron.*, 1985, **12**(7):599-607

[2] Miura K, Furuya H. Adaptive structure concept for future space applications [J]. *AIAA J.*, 1988(268):995-1002

[3] Zhao Mengliang. The Deployment Dynamic Analysis, Simulation and Test of the Space Deployable Structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, Doctoral dissertation, 2007. In Chinese (赵孟良. 空间可展结构展开过程动力学理论分析、仿真及试验 [D], 杭州: 浙江大学, 2007)

[4] Rahmat-samii Y. A Comparison between GO/Aperture-field and physical-optics methods for offset reflectors [J]. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, 1984, **32**(3):301-307

[5] Rahmat-samii Y. Nonuniform sampling techniques for antenna applications [J]. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, 1984, **35**(3):268-280

[6] Guan Fuling. Basic Study on Structural Shape Analysis of Spacial Struss and Applications on Communication Engineering [D]. Tokyo: Tokyo University, Doctoral dissertation, 1989

[7] Alan R. Cherrette a method for producing a shaped contour tadiation pattern using a single shaped reflector and single feed [J]. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, 1989, **37**(6):698-707

[8] Cherrette A R, Chang D C D. Phased array contour beam shaping by phase optimization [C]//Antennas propagate. Vancouver BC: Symp. int. symp. Dig., 1985, 475-478

[9] Yang Kezhong, Yang Zhiyou, Zhang Rirong. Modern Antenna Technology [M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 1990. In Chinese (杨可忠, 杨智友, 章日荣. 现代面天线新技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1990)

[10] Guan Fuling, Hou Guoyong, Zhao Mengliang. Program implementation of structure design for deployable truss antenna [J]. *J. Eng. Design*, 2006, **13**(2):108-114. In Chinese (关富玲, 侯国勇, 赵孟良. 构架式可展开天线结构设计的程序实现 [J]. 工程设计学报, 2006, **13**(2):108-114)