

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

H01Q 19/10 (2006.01)

G06F 17/00 (2006.01)

G06F 17/50 (2006.01)



# [12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200810018106.9

[43] 公开日 2008年9月17日

[11] 公开号 CN 101267062A

[22] 申请日 2008.4.30

[21] 申请号 200810018106.9

[71] 申请人 西安电子科技大学

地址 710071 陕西省西安市太白路2号

[72] 发明人 段宝岩 王从思 李鹏 张福顺

郑飞 保宏 王伟 仇原鹰

陈光达 黄进 朱敏波 宋立伟

[74] 专利代理机构 陕西电子工业专利中心

代理人 王品华 黎汉华

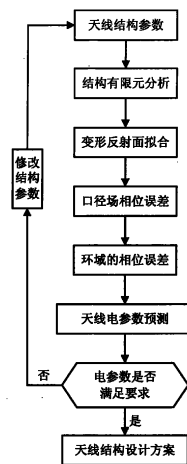
权利要求书3页 说明书11页 附图6页

## [54] 发明名称

基于拟合变形反射面的天线电性能预测方法

## [57] 摘要

本发明公开一种基于拟合变形反射面的天线电性能预测方法，主要解决天线设计中机电分离的问题。其过程是：基于天线结构有限元分析，得到反射面变形后的节点位移；根据反射面节点的理论设计坐标和变形后坐标的空间位置关系，对变形反射面进行拟合；利用拟合的反射面，计算天线表面法向误差以及该法向误差导致的相位误差；根据天线口径面的幅度和相位参数，计算天线远区电场分布；依据天线远区电场分布计算天线远区电场方向图，从方向图中得到电参数，实现反射面天线结构位移场与电磁场耦合的电性能预测。本发明可用于指导天线的结构设计及对不同工况下的天线机电性能综合分析与评价。



1. 一种基于拟合变形反射面的天线电性能预测方法，包括如下过程：

(1) 根据天线的反射面板、背架、中心体结构参数，确定天线结构有限元模型，得到反射面采样节点的理论坐标  $P(x_i, y_i, z_i)$ ；

(2) 利用有限元软件，对天线反射面结构进行有限元分析，得到反射面变形后采样节点的位移  $P(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$ ，并通过结构模型坐标系进行坐标转换，得到天线反射面的新坐标系；

(3) 在新的坐标系中，利用反射面变形后节点坐标与变形前节点坐标的最小差异，构造拟合抛物面的方程组，得到拟合变形反射面的方程；

(4) 利用拟合变形反射面方程，得到反射面变形后节点  $P(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i, z_i + \Delta z_i)$  的法线方向余弦及法向偏差  $\varepsilon_i$ ，计算各节点在口径面引起的相位误差  $\delta_i$ ；

(5) 将天线口径面分成  $N$  个环域，计算第  $n$  个环域上的  $K_n$  个节点对应的口径面相位误差，得到第  $n$  个环域对应的相位误差  $\delta_n$ ， $n = 1, \dots, N$ ；

(6) 确定天线口径面场振幅分布  $Q(\rho')$ ，依据每个环域的相位误差  $\delta_n$ ，通过天线远区电场分布函数，计算天线的电参数；

(7) 根据天线设计的电性能要求，判断计算出的天线电参数是否满足要求，如果满足要求则天线结构设计合格；否则，修改结构设计参数，并重复步骤(1)至步骤(6)，直至满足要求。

2、根据权利要求1所述的天线电性能预测方法，其特征在于步骤(3)按如下过程进行：

(3a) 在新的坐标系中，计算实际变形面与拟合变形反射面的坐标误差  $\Delta r$ ， $\Delta r = r(P_1) - r(P_0)$ ，式中， $P_1$  是天线变形面上采样点的坐标， $P_0$  是拟合变形反射面上采样点的坐标；

(3b) 利用实际变形面对拟合变形反射面的坐标误差  $\Delta r$ ，根据最小二乘原理和积分极值定理，构造方程组  $A \cdot \beta = H$ ，

$A$  为系数，

$$A = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{num} \frac{x_i^2}{2f} & \sum_{i=1}^{num} \frac{x_i y_i}{2f} & -\sum x_i & -\sum x_i y_i & \sum x_i^2 & \sum \frac{x_i z_i}{f} \\ \sum_{i=1}^{num} \frac{x_i y_i}{2f} & \sum_{i=1}^{num} \frac{y_i^2}{2f} & -\sum y_i & -\sum y_i^2 & \sum x_i y_i & \sum \frac{y_i z_i}{f} \\ \sum_{i=1}^{num} \frac{x_i z_i}{2f} & \sum_{i=1}^{num} \frac{y_i z_i}{2f} & -\sum z_i & -\sum y_i z_i & \sum x_i z_i & \sum \frac{z_i^2}{f} \\ \sum_{i=1}^{num} \frac{x_i}{2f} & \sum_{i=1}^{num} \frac{y_i}{2f} & -n & -\sum y_i & \sum x_i & \sum \frac{z_i}{f} \end{bmatrix}$$

$\beta$  为拟合抛物面的参数,  $\beta = (\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ \phi_x \ \phi_y \ \Delta f)^T$ ,

$$H = \left( \sum_{i=1}^{num} (z_i - z_i') x_i \ \sum_{i=1}^{num} (z_i - z_i') y_i \ \sum_{i=1}^{num} (z_i - z_i') z_i \ \sum_{i=1}^{num} (z_i - z_i') \right)^T;$$

(3c) 求解上述方程组, 得到拟合抛物面的参数  $\beta$ , 即  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$ 、 $\phi_x$ 、 $\phi_y$  及  $\Delta f$ ,

其中  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  为拟合抛物面顶点在原坐标系中的位移,  $\phi_x$ 、 $\phi_y$  分别为拟合抛物面的焦轴绕原坐标轴  $x$ 、 $y$  的转角,  $\Delta f$  为焦距变化量;

(3d) 将拟合抛物面的参数代入拟合反射面公式中, 得到拟合变形反射面的方程:

$$z = \frac{(x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2}{4(f + \Delta f)} + \Delta z + y\phi_x - x\phi_y$$

式中,  $f$  是变形前反射面的焦距。

3、根据权利要求 1 所述的天线电性能预测方法, 其特征在于步骤 (4), 按如下过程进行:

(4a) 根据变形后节点对拟合抛物面的法线方向余弦等于原设计抛物面上相应位置的法线方向余弦, 得到反射面变形后的节点  $P(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i, z_i + \Delta z_i)$  的法线方向余弦  $(l_i, m_i, n_i)$ :

$$l_i = \frac{-x_i}{2\sqrt{f(f+z_i)}}, \quad m_i = \frac{-y_i}{2\sqrt{f(f+z_i)}}, \quad n_i = \sqrt{\frac{f}{f+z_i}};$$

(4b) 由变形前节点  $P(x_i, y_i, z_i)$  的法线方向余弦, 得到经过节点  $P_1(x_0, y_0, z_0)$  的法线方程:

$$\frac{x - x_0}{l} = \frac{y - y_0}{m} = \frac{z - z_0}{n};$$

(4c) 求解法线方程, 得到过实际节点的法线方向直线与拟合抛物面交点的  $z$  坐标, 以及变形后的节点  $P_1(x_0, y_0, z_0)$  对应拟合抛物面的法线方向的交点  $P_0(x'_0, y'_0, z'_0)$  坐标;

(4d) 通过下式, 计算变形反射面的节点  $P_1$  相对于拟合抛物面节点  $P_0$  的法向偏差

$\varepsilon_i$  :

$$\varepsilon_i = \sqrt{(x_0 - x_0')^2 + (y_0 - y_0')^2 + (z_0 - z_0')^2} ;$$

(4e) 计算新的焦点和焦轴, 得到新的焦距  $f$  ;

(4f) 依据各节点的法向偏差  $\varepsilon_i$ , 计算各节点在天线口径面引起的相位误差  $\delta_i$  :

$$\delta_i = \frac{4\pi}{\lambda} \varepsilon_i \cos \xi_i$$

其中:  $\lambda$  为天线工作波长,  $\tan \xi_i = \rho_i' / 2f$ ,  $\rho_i'$  为节点  $P_i$  在口径面的对应半径。

4、根据权利要求 1 所述的天线电性能预测方法, 其特征在于步骤 (6), 按如下过程进行:

(6a) 依据如下公式计算天线口径场振幅分布  $Q(\rho)$  :

$$Q(\rho) = B + C \left( 1 - \frac{\rho^2}{a^2} \right)^P$$

式中,  $B + C = 1$ ,  $P$  为口径场分布参数;

(6b) 把每个块域相位误差  $\delta_j$  当作一个常数, 作为环形域中心对应的相位误差;

(6c) 根据上述口径场振幅分布和相位分布参数, 通过天线远区电场公式  $E = \iint_A Q(\rho') e^{j\delta(\rho')} e^{jk\hat{\rho}'\hat{r}} ds'$ , 计算天线远区电场分布, 式中  $\rho = \rho'/a$ ,  $\rho' = (a_{n-1} + a_n)/2 = (2n-1)a/2N$ ,  $\hat{r}$  为远区观察点到原点的距离矢量,  $k$  为波常数;;

(6d) 依据天线远区电场分布, 计算天线远区电场方向图, 从方向图中得到天线的增益、副瓣电平和波瓣宽度等电性能参数。

## 基于拟合变形反射面的天线电性能预测方法

### 技术领域

本发明属于天线技术领域，具体是一种基于拟合变形反射面的天线电性能预测方法。用于指导天线的结构设计、性能仿真分析与评价。

### 背景技术

随着通信、射电天文事业的发展，面天线正在向高频段、大口径的方向发展。大型面天线结构是典型的机电一体化结构，其机械性能与电性能相互影响、相互制约。工程中，电气工程师提出机械结构设计要求，而结构工程师只能凭经验分配各组成部件的设计精度。结果出现两种情况，一是后者用尽了所有办法、用上了最好的加工设备与手段，还是无法满足要求；二是在实际生产中，制造精度高的并非总能满足电性能指标，而有些制造精度没那么高的反倒可以满足电性能指标。结果导致天线制造成本高，研制周期长，其性能无法从根本上保证。

由于大型面天线的设计、制造与测试费用很高，因此要求其设计应当一次成型。但又因大型天线的口径达几十米，其重量多达 100 吨，给结构设计带来很大难度；同时由于这种大型的天线结构非常易受到外部环境作用而发生变形，使天线电性能受到影响。如结构变形使得天线效率降低、副瓣电平变高、方向性变差等。当高频段的天线工作频率达到 Ka 频段时，天线结构变形对天线电性能的影响将更为严重。由于现有技术中无法确定天线结构变形与电性能之间的定量关系，导致天线结构设计时必然存在机电分离的问题。

目前，国内外解决天线机电分离设计问题最常用的方法有如下几种：

(1) 从综合角度对天线进行集成分析，用优化建模的思想把各个机械、电磁等学科的设计要求进行统一考虑，这种方法考虑了机电综合设计的好处。如在 J.S. Liu, L. Hollaway. *Integrated structure-electromagnetic optimization of large reflector antenna systems. Structural and Multidisciplinary Optimization*, VOL. 16, NO. 1, July 1998 中所采用的方法就是这种综合优化方法。但该方法没有从根本上分析天线结构变形是如何影响天线电性能的，即不能在满足电性能指标前提下给出降低结构设计难度的方案。

(2) 利用天线反射面变形函数，得到各节点对天线电场的贡献，从而分析不同变形情况下的天线电性能变化情况，如在 K. Bahadori, Y. Rahmat-samii. *Characterization of effects of periodic and aperiodic surface distortions on membrane reflector antennas. IEEE Trans. Antennas*

and Propagation, VOL. 53, NO. 9, September 2005 中所采用的方法就是这种方法。该方法仅是假设反射面变形满足一定的三角函数分布，但实际中结构变形难以用某一具体函数给出。同时该方法的机电性能综合分析是建立在结构变形形状假设的基础上，不能反映天线结构变形与天线电性能之间的真实影响关系。

(3) 采用实际工程中的天线变形曲面上的测量点，以及理论节点仿真分析变形后作为计算对象，分析天线变形对天线电性能的影响，如在《现代雷达》1994年第1期“天线变形曲面的一种拟合方法”（华慕麟）文献中就采用这种方法。此方法工程应用价值大，但关键是要有实际加工、装配好的天线，且需在天线实物上进行测量分析。一般天线结构设计人员在仿真设计阶段需要知道当前结构下的天线电性能，并据此判断是否需要更改或重新设计天线结构，而不能在天线结构已确定、反射面已加工成形、装配也已完成的情况下，再分析天线的机电性能。

### 发明的内容

本发明的目的是避免上述现有技术方法的不足，提出一种基于拟合变形反射面的天线电性能预测方法，指导天线结构的机电一体化设计，以降低设计成本、提高天线机电综合性能。

实现本发明目的的技术方案是，基于天线结构有限元分析，得到反射面变形后的节点位移，根据反射面节点的理论设计坐标和变形后坐标的空间位置关系，对变形反射面进行拟合，并计算天线表面法向误差及该法相误差导致的口径面的相位误差，计算天线远区电场分布，绘制天线远区电场的方向图，进行面天线机电性能综合分析。具体过程如下：

(1) 根据天线的反射面板、背架、中心体结构参数，确定天线结构有限元模型，得到反射面采样节点的理论坐标  $P(x_i, y_i, z_i)$ ；

(2) 利用有限元软件，对天线反射面结构进行有限元分析，得到反射面变形后采样节点的位移  $P(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$ ，并通过结构模型坐标系进行坐标转换，得到天线反射面的新坐标系；

(3) 在新的坐标系中，利用反射面变形后节点坐标与变形前节点坐标的最小差异，构造拟合抛物面的方程组，得到拟合变形反射面的方程；

(4) 利用拟合变形反射面方程，得到反射面变形后节点  $P(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i, z_i + \Delta z_i)$  的法线方向余弦及法向偏差  $\varepsilon_i$ ，计算各节点在口径面引起的相位误差  $\delta_i$ ；

(5) 将天线口径面分成  $N$  个环域，计算第  $n$  个环域上的  $K_n$  个节点对应的口径面相位误差，得到第  $n$  个环域对应的相位误差  $\delta_n$ ， $n = 1, \dots, N$ ；

(6) 确定天线口径面场振幅分布  $Q(\rho')$ ，依据每个环域的相位误差  $\delta_n$ ，通过天线远区电场分布函数，计算天线的电参数；

(7) 根据天线设计的电性能要求，判断计算出的天线电参数是否满足要求，如果满足要求则天线结构设计合格；否则，修改结构设计参数，并重复步骤(1)至步骤(6)，直至满足要求。

所述步骤(3)，按如下过程进行：

(3a) 在新的坐标系中，计算实际变形面与拟合变形反射面的坐标误差  $\Delta r$ ， $\Delta r = r(P_1) - r(P_0)$ ，式中， $P_1$  是天线变形面上采样点的坐标， $P_0$  是拟合变形反射面上采样点的坐标；

(3b) 利用实际变形面对拟合变形反射面的坐标误差  $\Delta r$ ，根据最小二乘原理和积分极值定理，构造方程组  $A \cdot \beta = H$ ，

$A$  为系数，

$$A = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{num} \frac{x_i^2}{2f} & \sum \frac{x_i y_i}{2f} & -\sum x_i & -\sum x_i y_i & \sum x_i^2 & \sum \frac{x_i z_i}{f} \\ \sum_{i=1}^{num} \frac{x_i y_i}{2f} & \sum \frac{y_i^2}{2f} & -\sum y_i & -\sum y_i^2 & \sum x_i y_i & \sum \frac{y_i z_i}{f} \\ \sum_{i=1}^{num} \frac{x_i z_i}{2f} & \sum \frac{y_i z_i}{2f} & -\sum z_i & -\sum y_i z_i & \sum x_i z_i & \sum \frac{z_i^2}{f} \\ \sum_{i=1}^{num} \frac{x_i}{2f} & \sum \frac{y_i}{2f} & -n & -\sum y_i & \sum x_i & \sum \frac{z_i}{f} \end{bmatrix}$$

$\beta$  为拟合抛物面的参数， $\beta = (\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ \phi_x \ \phi_y \ \Delta f)^T$ ，

$$H = \left( \sum_{i=1}^{num} (z_i - z_i') x_i \ \sum_{i=1}^{num} (z_i - z_i') y_i \ \sum_{i=1}^{num} (z_i - z_i') z_i \ \sum_{i=1}^{num} (z_i - z_i') \right)^T ;$$

(3c) 求解上述方程组，得到拟合抛物面的参数  $\beta$ ，即  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$ 、 $\phi_x$ 、 $\phi_y$  及  $\Delta f$ ，其中  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  为拟合抛物面顶点在原坐标系中的位移， $\phi_x$ 、 $\phi_y$  分别为拟合抛物面的焦轴绕原坐标轴  $x$ 、 $y$  的转角， $\Delta f$  为焦距变化量；

(3d) 将拟合抛物面的参数代入拟合反射面公式中，得到拟合变形反射面的方程：

$$z = \frac{(x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2}{4(f + \Delta f)} + \Delta z + y\phi_x - x\phi_y$$

式中， $f$  是变形前反射面的焦距。

所述步骤(4)，按如下过程进行：

(4a) 根据变形后节点对拟合抛物面的法线方向余弦等于原设计抛物面上相应位置的法

线方向余弦，得到反射面变形后的节点  $P(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i, z_i + \Delta z_i)$  的法线方向余弦  $(l_i, m_i, n_i)$ ：

$$l_i = \frac{-x_i}{2\sqrt{f(f+z_i)}}, m_i = \frac{-y_i}{2\sqrt{f(f+z_i)}}, n_i = \sqrt{\frac{f}{f+z_i}};$$

(4b) 由变形前节点  $P(x_i, y_i, z_i)$  的法线方向余弦，得到经过节点  $P_1(x_0, y_0, z_0)$  的法线方程：

$$\frac{x-x_0}{l} = \frac{y-y_0}{m} = \frac{z-z_0}{n};$$

(4c) 求解法线方程，得到过实际节点的法线方向直线与拟合抛物面交点的  $z$  坐标，以及变形后的节点  $P_1(x_0, y_0, z_0)$  对应拟合抛物面的法线方向的交点  $P_0(x'_0, y'_0, z'_0)$  坐标；

(4d) 通过下式，计算变形反射面的节点  $P_1$  相对于拟合抛物面节点  $P_0$  的法向偏差  $\varepsilon_i$ ：

$$\varepsilon_i = \sqrt{(x_0 - x'_0)^2 + (y_0 - y'_0)^2 + (z_0 - z'_0)^2};$$

(4e) 计算新的焦点和焦轴，得到新的焦距  $f$ ；

(4f) 依据各节点的法向偏差  $\varepsilon_i$ ，计算各节点在天线口径面引起的相位误差  $\delta_i$ ：

$$\delta_i = \frac{4\pi}{\lambda} \varepsilon_i \cos \xi_i$$

其中： $\lambda$  为天线工作波长， $\tan \xi_i = \rho_i' / 2f$ ， $\rho_i'$  为节点  $P_1$  在口径面的对应半径。

所述步骤 (6)，按如下过程进行：

(6a) 依据如下公式计算天线口径场振幅分布  $Q(\rho)$ ：

$$Q(\rho) = B + C \left(1 - \frac{\rho^2}{a^2}\right)^P$$

式中， $B + C = 1$ ， $P$  为口径场分布参数， $a$  为反射面天线半径；

(6b) 把每个块域相位误差  $\delta_j$  当作一个常数，作为环形域中心对应的相位误差；

(6c) 根据上述口径场振幅分布和相位分布参数，通过天线远区电场公式  $E = \iint_A Q(\rho') e^{j\delta(\rho')} e^{jk\hat{\rho}'\hat{r}} ds'$ ，计算天线远区电场分布，式中  $\rho = \rho'/a$ ， $\rho' = (a_{n-1} + a_n)/2 = (2n-1)a/2N$ ， $\hat{r}$  为远区观察点到原点的距离矢量， $k$  为波常数；

(6d) 依据天线远区电场分布，计算天线远区电场方向图，从方向图中得到天线的增益、副瓣电平和波瓣宽度等电性能参数。

本发明与现有技术相比，具有如下优点：



1. 利用反射面变形后节点坐标与变形前节点坐标的最小差异，构造拟合抛物面的方程，拟合出变形反射面，通过该拟合反射面易于找到变形节点的法向并计算该点的法向误差；
2. 由于将节点法向误差通过光程差引入到天线口径面的相位误差中，使天线结构位移场与电磁场紧密联系，因而避免了仅使用反射面精度来判断天线性能的不足，实现天线的机电综合分析；
3. 通过计算天线远区电场分布，得到天线电参数，并将计算的电参数与天线电性能要求对比，通过结构设计过程中的电性能预测，判断结构设计的合理性，避免了凭经验进行天线结构设计，实现了天线的机电一体化设计。

#### 附图说明

- 图 1 是本发明反射面天线电性能预测流程图；
- 图 2 是本发明拟合变形反射面流程图；
- 图 3 是本发明计算口径面相位误差流程图；
- 图 4 是本发明计算反射面天线电参数流程图；
- 图 5 是反射面天线处于任意位姿的示意图；
- 图 6 是反射面天线处于仰天状态的示意图；
- 图 7 是拟合抛物面的几何参数关系示意图；
- 图 8 是变形反射面天线的法向误差示意图；
- 图 9 是反射面天线口径面分环示意图；
- 图 10 是本发明仿真所用的 7.3m 天线结构三维模型示意图。

#### 具体实施方式

以下参照附图对本发明作进一步详细描述。

参照图 1，本发明的具体步骤如下：

**步骤一**，建立反射面天线有限元模型。

根据已经给定天线口径  $D$ 、焦距  $f$ 、反射面板、辐射梁、环梁、中心体基本参数，确定天线结构有限元模型，得到反射面采样节点的理论坐标  $P(x_i, y_i, z_i)$ 。同时，确定反射面顶点在模型坐标系中的坐标  $h$ ，一般为  $Z$  向高度。

**步骤二**，对有限元模型进行分析，得到变形后的采样节点信息。

利用有限元软件，对天线反射体结构在自重、风荷、振动、温度荷载和冰雪荷载不同工况下进行有限元分析，得到反射面采样节点的位移  $P(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$ ，并依据结构模型的坐标系进行坐标转换，得到变形后的以反射面顶点为原点，天线口径面为  $XY$  平面，焦轴为  $Z$

轴的新坐标系，其过程如图 5 和图 6 所示。

将图 5 所示方位角与俯仰角分别为  $az$  和  $el$  的任意位姿的天线，使用坐标转换公式：

$(x^* \ y^* \ z^* \ 1) = (x \ y \ z \ 1)R_y(90^\circ - az)R_x(el)R_x(-90^\circ)$  转换为如图 6 所示的仰天状态。式中， $(x^*, y^*, z^*)$  为处于指定位置  $(az, el)$  的天线在仰天状态坐标系  $O'-x'y'z'$  中的坐标， $(x, y, z)$  为处于指定位置  $(az, el)$  的天线在坐标系  $O-xyz$  中的坐标， $R_x(\theta)$  和  $R_y(\phi)$  都是坐标转化矩阵，它们分别为：

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_y(\phi) = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & -\sin\phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\phi & 0 & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

步骤三，拟合变形反射面。

参照图 2，变形反射面拟合的具体步骤如下：

1) 在新的坐标系中，计算实际变形面与拟合变形反射面的坐标误差  $\Delta r$ ， $\Delta r = r(P_1) - r(P_0)$ ，式中， $P_1$  是天线变形面上采样点的坐标， $P_0$  是拟合变形反射面上采样点的坐标，该实际变形面和拟合反射面的关系如图 7 所示；

2) 采用变形曲面的实测点  $P_1$  与拟合面对应点  $P_0$  的轴向误差来构造条件方程，根据最小二乘原理和积分极值定理，得到如下方程组：

$$A \cdot \beta = H \quad (1)$$

其中，

$$A = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{num} \frac{x_i^2}{2f} & \sum \frac{x_i y_i}{2f} & -\sum x_i & -\sum x_i y_i & \sum x_i^2 & \sum \frac{x_i z_i}{f} \\ \sum_{i=1}^{num} \frac{x_i y_i}{2f} & \sum \frac{y_i^2}{2f} & -\sum y_i & -\sum y_i^2 & \sum x_i y_i & \sum \frac{y_i z_i}{f} \\ \sum_{i=1}^{num} \frac{x_i z_i}{2f} & \sum \frac{y_i z_i}{2f} & -\sum z_i & -\sum y_i z_i & \sum x_i z_i & \sum \frac{z_i^2}{f} \\ \sum_{i=1}^{num} \frac{x_i}{2f} & \sum \frac{y_i}{2f} & -n & -\sum y_i & \sum x_i & \sum \frac{z_i}{f} \end{bmatrix}$$

$$\beta = (\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ \phi_x \ \phi_y \ \Delta f)^T$$

$$H = \left( \sum_{i=1}^{num} (z_i - z_i') x_i \ \sum_{i=1}^{num} (z_i - z_i') y_i \ \sum_{i=1}^{num} (z_i - z_i') z_i \ \sum_{i=1}^{num} (z_i - z_i') \right)^T$$

其中： $num$  为采样节点总数， $(x_i, y_i, z_i')$  为节点理论坐标  $(x_i, y_i, z_i)$  在变形反射面对应的节

点坐标,  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  为拟合抛物面顶点在原坐标系中的位移,  $\phi_x$ 、 $\phi_y$  分别为拟合抛物面的焦轴绕原坐标轴  $x$ 、 $y$  的转角,  $\Delta f$  为焦距变化量,  $f$  是变形前反射面的焦距;

3) 求解上述方程组(1), 得到拟合抛物面的 6 个待定几何参数  $\beta$ , 即  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$ 、 $\phi_x$ 、 $\phi_y$  及  $\Delta f$ ;

4) 将拟合抛物面的参数代入拟合反射面公式中, 得到拟合变形反射面的方程:

$$z = \frac{(x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2}{4(f + \Delta f)} + \Delta z + y\phi_x - x\phi_y. \quad (2)$$

步骤四, 计算口径面的相位误差。

参照图 3, 口径面相位误差的计算过程如下:

1) 根据变形后节点对拟合抛物面的法线方向余弦等于原设计抛物面上相应位置的法线方向余弦, 得到反射面变形后的节点  $P(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i, z_i + \Delta z_i)$  的法线方向余弦为

$$l_i = \frac{-x_i}{2\sqrt{f(f+z_i)}}, m_i = \frac{-y_i}{2\sqrt{f(f+z_i)}}, n_i = \sqrt{\frac{f}{f+z_i}} \quad (3)$$

其中:  $(l_i, m_i, n_i)$  为节点  $P$  的法线方向余弦。

2) 由变形后的节点  $P(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i, z_i + \Delta z_i)$  的法线方向余弦, 得到经过节点  $P_1(x_0, y_0, z_0)$  的法线方程:

$$\frac{x - x_0}{l} = \frac{y - y_0}{m} = \frac{z - z_0}{n} \quad (4)$$

点  $P(x_P, y_P, z_P)$  为反射面节点变形前的位置, 点  $P_1$  为节点  $P$  变形后的实际位置, 点  $P_0$  为节点  $P_1$  沿法线方向与拟合抛物面的交点, 如图 8 所示, 图 8 描述了具有表面误差的反射面天线的几何形状。

3) 求解此方程(4), 得到变形后的节点  $P_1(x_0, y_0, z_0)$  对应拟合抛物面的法线方向的交点  $P_0(x'_0, y'_0, z'_0)$  坐标为:

$$\begin{cases} x'_0 = c1 \cdot z + c2 \\ y'_0 = c3 \cdot z + c4 \\ z'_0 = \frac{1 - s3 - s4 - \sqrt{(s3 + s4 - 1)^2 - 4 \cdot s2s5 - 4 \cdot s2s6}}{2 \cdot s2} \end{cases} \quad (5)$$

式中:

$$c1 = \frac{l}{n}, \quad c2 = -\frac{l}{n}z_0 + x_0, \quad c3 = \frac{m}{n}, \quad c4 = -\frac{m}{n}z_0 + y_0,$$

$$s1 = 4(f + \Delta f), \quad s2 = \frac{c1^2 + c3^2}{s1}, \quad s3 = \frac{2[c1(c2 - \Delta x) + c3(c4 - \Delta y)]}{s1},$$

$$s_4 = c_3 \cdot \phi_x - c_1 \cdot \phi_y, \quad s_5 = \frac{(c_2 - \Delta x)^2 + (c_4 - \Delta y)^2}{s_1}, \quad s_6 = \Delta z + c_4 \cdot \phi_x - c_2 \cdot \phi_y$$

4) 通过变形反射面的节点  $P_1$  计算该点相对于拟合抛物面的法向偏差为:

$$\varepsilon_i = \sqrt{(x_0 - x_0')^2 + (y_0 - y_0')^2 + (z_0 - z_0')^2} \quad (6)$$

5) 确定焦轴的位置

理论抛物面的坐标系为  $O-xyz$ , 拟合抛物面的坐标系为  $O'-x'y'z'$ , 其中  $O$  与  $O'$  分别为它们的顶点,  $Oz$  与  $O'z'$  分别为它们的焦轴。

理论抛物面的方程为:  $x^2 + y^2 = 4fz$

拟合抛物面的方程为:  $x'^2 + y'^2 = 4(f + \Delta f)z'$

再令  $\phi_z$  为坐标系  $O'-x'y'z'$  绕原坐标轴  $Oz$  的转角。因  $\phi_x, \phi_y, \phi_z$  均为微量, 则可忽略它们的二阶微量, 故两坐标系的坐标转换方程为

$$\begin{cases} x_1 = (x - \Delta x) - z\phi_y + y\phi_z \\ y_1 = (y - \Delta y) - x\phi_z + z\phi_x \\ z_1 = (z - \Delta z) - y\phi_x + x\phi_y \end{cases} \quad (7)$$

通过式(2)可知, 拟合抛物面的顶点, 即新坐标系的原点在原坐标系  $O-xyz$  中的坐标为  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ , 新焦轴的焦点  $F'$  在  $O-xyz$  中的坐标为  $(x_{F'}, y_{F'}, z_{F'})$ , 在新坐标系  $O'-x'y'z'$  中的坐标为  $(0, 0, f + \Delta f)$ 。因此, 原坐标系  $O-xyz$  的原点在新的坐标系  $O'-x'y'z'$  中的坐标为  $(-\Delta x, -\Delta y, -\Delta z)$ , 其坐标系绕新的坐标轴  $O'x'$ 、 $O'y'$ 、 $O'z'$  的转角分别为  $-\phi_x$ 、 $-\phi_y$  和  $-\phi_z$ , 则可得新焦点在原坐标系  $O-xyz$  中的坐标为

$$\begin{cases} x_{F'} = \Delta x + (f + \Delta f) \cdot \phi_y \\ y_{F'} = \Delta y - (f + \Delta f) \cdot \phi_x \\ z_{F'} = f + \Delta f + \Delta z \end{cases} \quad (8)$$

6) 依据各节点的法向偏差  $\varepsilon_i$ , 计算各节点在口径面引起的相位误差  $\delta_i$

$$\delta_i = \frac{4\pi}{\lambda} \varepsilon_i \cos \xi_i \quad (9)$$

其中:  $\lambda$  为天线工作波长,  $\tan \xi_i = \rho_i' / 2f$ ,  $\rho_i'$  为节点  $P_1$  在口径面的对应半径,  $f$  为新的焦点坐标;

步骤五, 计算每个环域的相位误差。

如图 9 所示, 把天线口面分成  $N$  个环域, 在第  $n(n=1, \dots, N)$  个环域上有  $K_n$  个节点。假设天线反射面上有  $num$  个目标点, 则  $num$  与  $K_n$  满足如下关系:

$$num = \sum_{n=1}^N K_n \quad (10)$$

根据式(9)计算第  $n$  个环域上  $K_n$  个节点对应的口径面相位误差, 得到第  $n$  个环域对应的相位误差  $\delta_n$  为:

$$\delta_n = \sqrt{\frac{1}{K_n} \sum_{j=1}^{K_n} \delta_j^2} \quad (11)$$

步骤六, 计算天线电参数。

参照图 4, 天线电参数的计算步骤如下:

1) 计算口径场振幅分布  $Q(\rho)$  为

$$Q(\rho) = B + C \left(1 - \frac{\rho^2}{a^2}\right)^P \quad (12)$$

其中,  $B + C = 1$ , 选择合适的  $B$ , 就可以产生不同的口径场边缘照射电平, 口径场分布参数  $P$  用来控制口径场分布的形状;

2) 把每个块域相位误差  $\delta_j$  当作一个常数, 作为环形域中心对应的相位误差;

3) 根据上述口径场振幅分布和相位分布参数, 通过口径分布的变换公式计算电场分布:

$$E = \iint_A Q(\rho') e^{j\delta(\rho')} e^{jk\bar{\rho}' \cdot \bar{r}} ds' \quad (13)$$

对式 (13) 进行离散化处理, 以计算天线的远区电场分布:

$$E = 2\pi a^2 \sum_{n=1}^N E_{n,n-1} e^{j\delta_n} \quad (14)$$

其中

$E_{n,n-1} = E_n - E_{n-1}$ ,  $E_n = \int_0^{n/N} Q(\rho) J_0(u\rho) \rho d\rho$ ,  $\rho' = (a_{n-1} + a_n)/2 = (2n-1)a/2N$ ,  $\rho = \rho'/a$ ,  $u = ka \sin\theta$ ,  $a$  为口面半径,  $k$  为自由空间波常数,  $\theta$  为远区目标点的方位角,  $J_0(*)$  为第一类 Bessel 函数。

4) 依据天线远区电场分布, 计算天线远区电场方向图, 从方向图中得到天线的增益、副瓣电平和波瓣宽度等电性能参数。

步骤七, 根据天线设计的电性能要求, 判断计算出的天线电参数是否满足要求, 如果满足要求则天线结构设计方案合格; 否则, 修改结构设计参数, 并重复步骤 (1) 至步骤 (6), 直至天线电参数满足要求。

本发明的优点可通过以下仿真实验进一步说明：

### 1. 仿真条件

将本发明的天线机电性能综合分析方法编为“反射面天线机电性能综合分析软件”，在7.3m口径船载抛物面天线上进行天线反射体结构与电性能预测实验。

该天线反射面为实板型，背架属桁架类。块面板采用刚性面板结构型式设计，由拉伸蒙皮和经拉伸成型的纵向筋、环向筋铆接而成。单块面板构件的材质均采用硬铝钣 LY12-M，在有限元分析时视为壳单元，在 ANSYS 软件中取 Shell 63。整个天线径向分为三圈，沿中心体圆周均匀布有 16 片辐射梁，48 根环形梁。工作频段为 Ku 频段和 C 频段，该 Ku 频段增益要求  $\geq 57.2\text{dB}$ ，该 C 频段增益要求  $\geq 50.2\text{dB}$ 。副瓣包络满足 CCIR.580-2 要求，工作风速为 20m/s，生存风速为 55m/s，工作环境温度范围为  $-45^{\circ}\text{C}$  至  $60^{\circ}\text{C}$ ，表面法向精度指标是 0.5mm，整个天线反射体结构重量  $\leq 1.5$  吨。利用本发明的天线结构位移场与电磁场耦合模型，把 7.3m 船载天线反射体结构重量从 1.5 吨降低到 1.2 吨，且把天线增益提高到 58.76dB。这里取天线照射锥削为 -10dB，口径场分布参数等于 1，工作频率为 14GHz。

### 2. 仿真结果

利用以上条件仿真所建立的天线结构模型，如图 10 所示。仿真在自重和风荷作用下，不同工作仰角时，一共八种工作状况的天线电性能参数，如表 1 所示。

表 1 仿真在不同工作状况下的天线电性能主要参数

工况	增益 (dB)	增益损 失(dB)	法向均方 根(mm)	第一副 瓣(dB)	第二副 瓣(dB)
俯仰角 $0^{\circ}$ (指平), 仅自重	58.750	0.01185	0.09926	-22.260	-29.420
俯仰角 $17^{\circ}$ , 仅自重	58.751	0.01085	0.09497	-22.270	-29.420
俯仰角 $30^{\circ}$ , 仅自重	58.752	0.0089198	0.08611	-22.274	-29.420
俯仰角 $45^{\circ}$ , 仅自重	58.755	0.005985	0.07054	-22.280	-29.419
俯仰角 $60^{\circ}$ , 仅自重	58.758	0.003051	0.05036	-22.287	-29.418
俯仰角 $90^{\circ}$ (仰天), 仅自重	58.761	0.0001167	0.00985	-22.290	-29.420
仰天, 自重与 侧吹风荷 (20m/s)	58.710	0.05126	0.20642	-22.277	-29.430
指平, 自重与 侧吹风荷 (20m/s)	58.704	0.056154	0.21605	-22.256	-29.435

从表 1 中数据可看出，基于本发明的机电集成方法所建立的天线，在俯仰角为  $90^{\circ}$  的自

---

重工况下的天线增益为 58.761dB，满足  $\geq 57.2$ dB 的设计要求。

通过该软件的实验结果，证明采用本发明的方法可用于进行反射面天线结构与电性能预测。

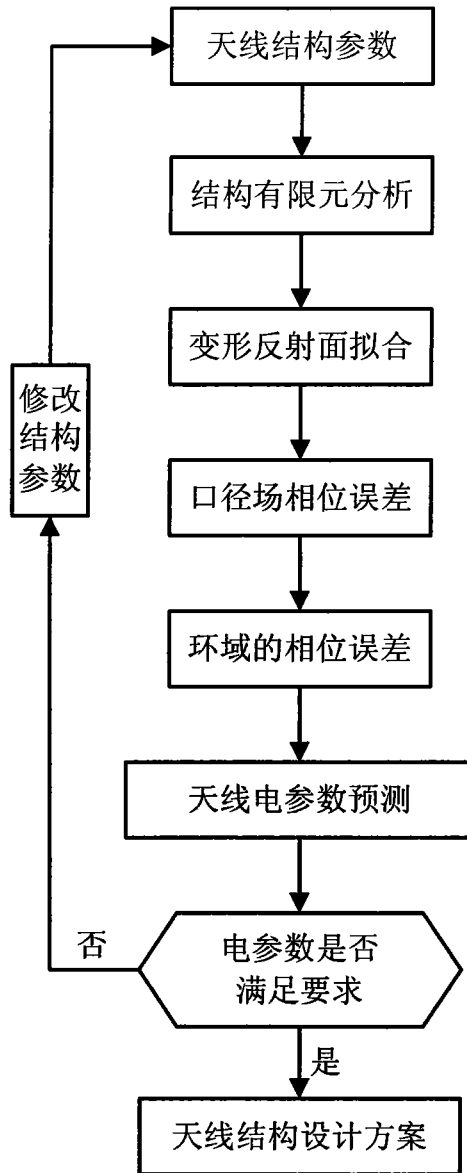


图 1



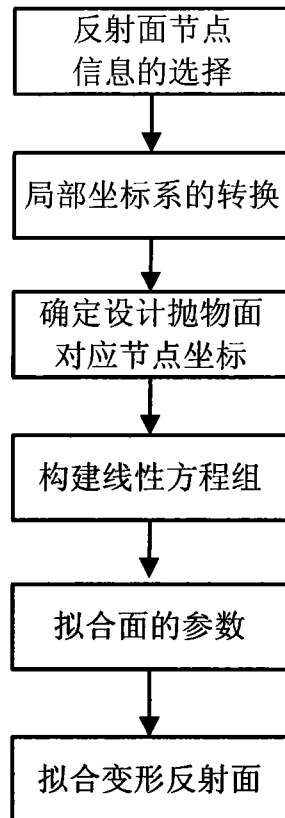


图 2

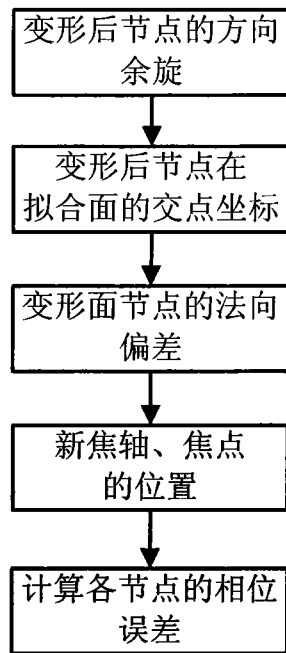


图 3

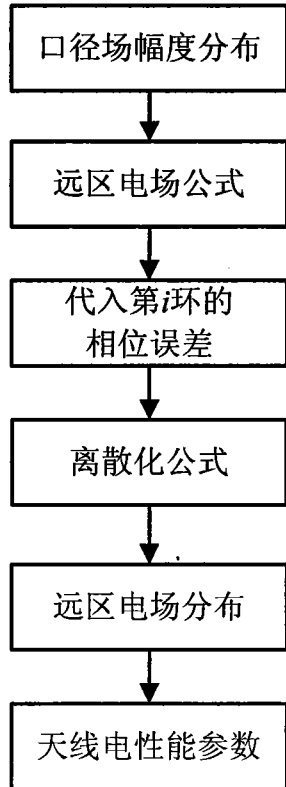


图 4

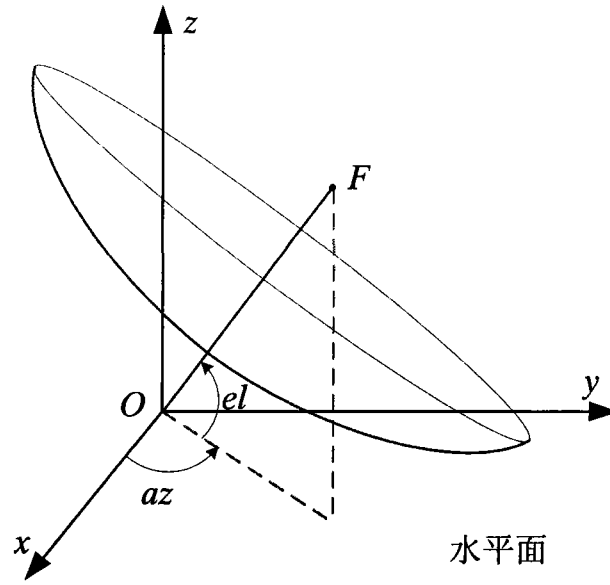


图 5

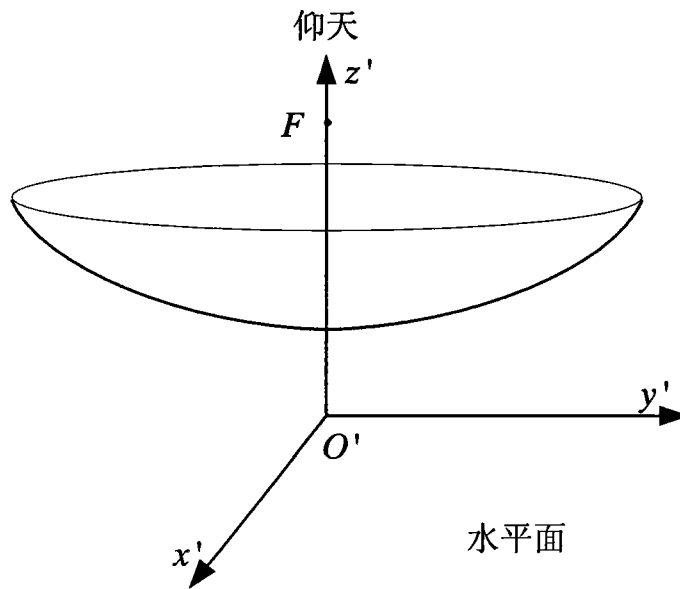


图 6

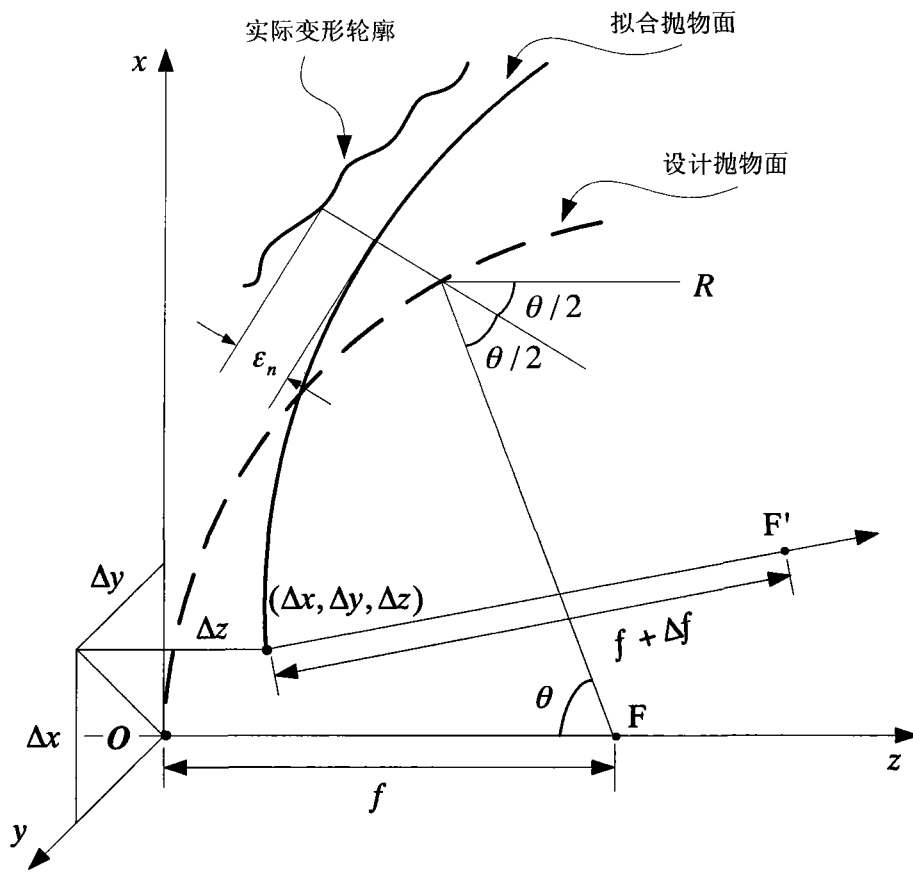


图 7

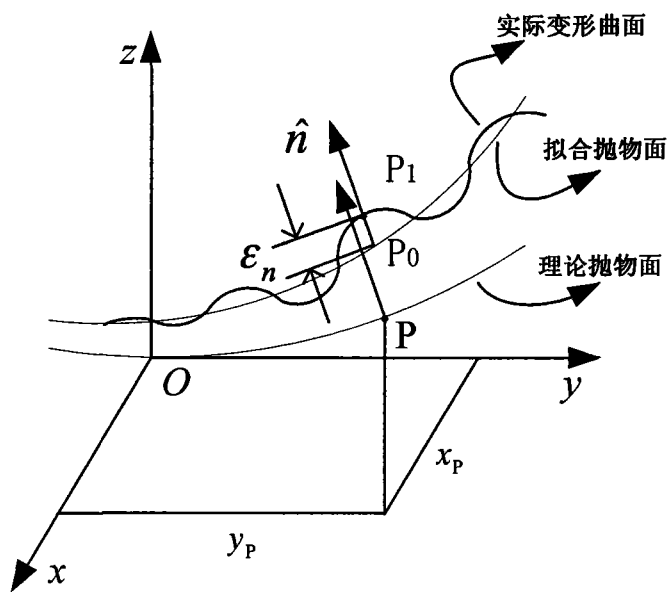


图 8

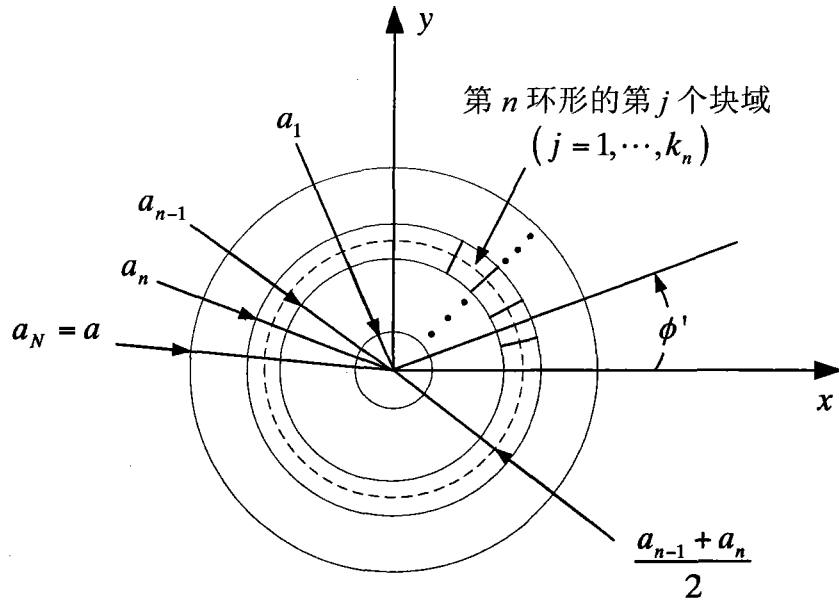


图 9

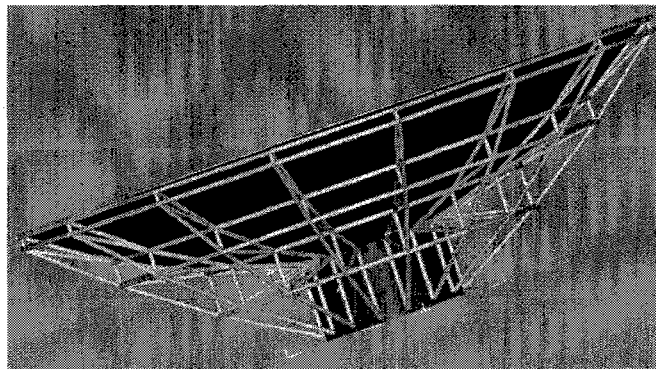


图 10