

最佳吻合下变形反射面天线电性能机电解耦 计算方法

张树新, 梁昌艺

(西安电子科技大学高性能电子装备机电集成制造全国重点实验室, 陕西西安 710071)

摘要: 多源载荷作用下反射面天线机电耦合分析、设计与调控是大口径反射面天线设计的难点。现有机电耦合计算方法采用积分运算模型, 无法将结构变形进行解耦, 导致积分运算复杂, 计算耗时。针对多源载荷作用下变形反射面天线机电耦合计算复杂, 难以开展电性能快速评估、调控等问题, 提出了一种最佳吻合下变形反射面天线电性能机电解耦计算方法。以最佳吻合操作后的天线状态为基准, 采用最佳吻合获得的法向偏差作为电性能计算的结构输入; 利用相位项二阶展开近似方法, 将结构变形分离出原有积分运算之外, 使得原有积分运算转换为矩阵相乘模型; 通过结构变形的分离与机电解耦, 建立了最佳吻合下变形反射面天线电性能机电解耦计算模型, 实现了最佳吻合下电性能快速解耦运算。以8 m反射面天线为典型案例, 以假设结构变形、不同仰角下的重力与风载荷变形信息为结构输入, 开展了多源载荷作用下天线电性能机电解耦计算方法的验证。仿真案例表明, 在多源载荷作用下反射面天线电性能计算结果中, 所提机电解耦计算方法可以获得与原有积分运算模型相吻合的天线方向图, 且增益损失偏差在0.1 dB以内, 具有较高的计算精度, 满足天线设计要求。与原有积分模型相比, 所提模型在保证计算精度的情况下, 多源载荷作用下变形反射面天线电性能计算效率可提升95%, 从而为电性能快速评估、调控等奠定基础。

关键词: 最佳吻合; 反射面天线; 电性能; 法向偏差; 机电解耦

基金项目: 国家自然科学基金(No.52322507)

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2025)09-3134-13

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20250286

A Mechanical Electromagnetic Decoupling Computational Method for Radiation Performance of Distorted Reflector Antennas with the Best Fit Paraboloid

ZHANG Shu-xin, LIANG Chang-yi

(National Key Laboratory of Integrated Electro-mechanical Manufacturing of High-performance Electronic Equipment, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The mechanical-electromagnetic coupling analysis, design, and control of reflector antennas under multi-source loads are key challenges in the design of large-aperture reflector antennas. The existing mechanical-electromagnetic coupling calculation method adopts integral operation models, which fails to decouple the structural deformations and leads to both complex integral operation and high computational time consumption. Distorted reflector antennas suffer from multi-source loads, which makes the mechanical-electromagnetic coupling analysis complex and can not support the fast estimation and adjustment for electromagnetic performance. To solve this problem, a mechanical-electromagnetic decoupling computational method is proposed to obtain the radiation performance for distorted reflector antennas with the best fit paraboloid. Taking the antenna state under the operation of best fit paraboloid as the basis, the normal distortion is taken as the structural input for the electromagnetic computation. Adopting the second order series expansion of the phase component, the structural distortion is separated from the electromagnetic computation, which makes the original integral computation convert to a matrix multiplication model. With the separation of structural distortion and the mechanical-electromagnetic decoupling, the mechanical-electromagnetic decoupling computational model is established for distorted reflector antennas with the best fit paraboloid, and the fast decoupling electromagnetic computation is achieved. Taking an 8 m reflector anten-

na as a typical example, and introducing hypothetical structural deformations as well as deformations caused by gravity and wind loads at different elevation angles as structural inputs, the verification of the mechanical-electromagnetic decoupling computational method for antenna electromagnetic performance under multi-source loads is carried out. Simulation shows that in the calculation results of antenna electromagnetic performance under multi-source loads, the proposed mechanical-electromagnetic decoupling computational method can obtain a well matched antenna radiation pattern with that of the original integral operation model. Moreover, the deviation of gain loss between the two models is within 0.1 dB, indicating the high calculation accuracy of the proposed method that meets the antenna design requirements. Compared with the original integral model, the proposed method can guarantee computational accuracy, and improve the computation efficiency about 95% of the electromagnetic performance for distorted reflector antennas under multi-source loads, which can pave the foundation for the fast estimation and adjustment of electromagnetic performance.

Key words: best fit; reflector antennas; electromagnetic performance; normal distortion; mechanical-electromagnetic decoupling

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.52322507)

1 引言

作为一种高增益天线,反射面天线广泛应用于射电天文、通信、雷达等领域^[1-3]。依靠抛物面汇聚电磁波的原理,反射面天线能够实现较高的天线增益。在实际服役环境下,考虑到自重、风荷、温度等外部多源载荷影响,天线所要求的抛物面形状往往偏离理想设计曲面要求,导致天线增益下降、波束偏移、电性能恶化。为了满足天线电性能要求,在天线结构设计中需考虑面形精度、甚至电性能要求,并依据电性能要求进行天线结构设计。这种多源载荷影响反射面形状,进而影响电性能,并通过电性能指导天线结构设计的问题就是反射面天线机电耦合问题^[4]。图1为某反射面天线受自重、横风载荷影响的变形示意图。

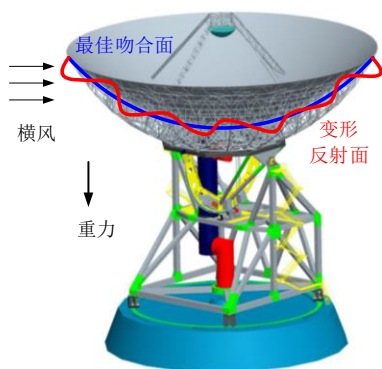


图1 某反射面天线受自重、横风载荷影响的变形示意图

在多源载荷影响天线电性能的问题上,已有诸多文献开展了相关研究,主要集中在重力、风荷等主要外部载荷对天线增益、指向精度的影响。Dong等^[5]分析了天马射电望远镜天线重力变形对天线增益的影响。付丽等^[6]分析了平均风作用下的天马望远镜面形精度和指向精度的变化情况,给出了天马射电望远镜受外部载荷影响下性能的相关变化数据。Li等^[7]针对全可动射电望远镜天线受到的横风干扰,开展了天线性能仿

真与预测。在反射面天线机电耦合问题上,段宝岩^[8]提出了反射面天线机电耦合模型,将电性能表示为结构设计变量的函数,并开展了相关工程应用验证。为了满足载荷作用下的反射面天线电性能,段宝岩等^[9]提出了以天线电性能为目标的机电多学科优化设计,实现了面向电性能的天线结构设计。针对射电天文应用最多的双反射面天线,王伟等^[10]开展了变形情况下的双反射面天线机电耦合分析。

随着相关需求的发展,单纯依靠结构设计手段难以实现反射面天线高频段、高增益、高精度的苛刻性能指标要求。在实际服役环境下,主动补偿成为满足性能指标要求的常见手段^[11]。在主动补偿方面,常见的结构补偿是通过面板背后的促动器完成对不同俯仰角度下反射面变形的补偿^[12]。班友等^[13]针对110米QTT射电望远镜天线开展了简化促动器的主动结构建模与分析。同时,采用相控阵馈源也可在电磁角度,实现对变形影响下恶化电性能的补偿^[14-16]。与天线设计阶段不同,无论是结构补偿还是电磁补偿,都需要对天线形面、电性能等进行快速评估,进而达到快速调控与补偿的目的。考虑到反射面天线电性能受结构变形影响的机电耦合问题,现有机电耦合建模、分析等计算方法运算繁琐复杂,难以实现对变形反射面天线电性能的快速评估,导致无法实现快速调控,出现了补偿滞后的问题。制约电性能快速评估的关键在于反射面天线远区电场的辐射积分运算;采用积分运算的机电耦合模型,无法将结构变形进行解耦,导致积分运算繁琐复杂,计算耗时。

为了提高变形反射面天线电性能计算效率,Smith等^[17]以理想状态为基准,将结构变形引入的附加相位项按照轴向变形的形式进行二阶展开,提出了一种用于反射面天线赋形设计的快速分析方法。在此基础上,文献[18]利用结构有限元插值,以理想状态为基准,将远区电场描述为结构轴向变形的二阶展开模型,用于

随机误差分析与分配. 文献[17,18]提出的二阶展开模型以理想状态为出发点,用于反射面天线赋形设计、随机误差分析,提高了反射面天线电气设计效率. 然而,文献[17,18]以理想状态下的反射面为基准,忽略了在载荷作用下,反射面天线在最佳吻合运算^[19-21]操作下,馈源可移动至最佳吻合焦点上,导致最佳吻合面与理想设计面具有较大差距;在此情况下,电性能运算需采用变形反射面相对最佳吻合面的结构变形,而非相对理想设计面的误差作为结构输入,才能准确获得最佳吻合状态下的天线电性能. 为此,最佳吻合状态下的变形反射面天线电性能计算方法是后续电性能快速评估、调控与补偿的关键.

结合以上应用需求,针对多源载荷作用下变形反射面天线机电耦合计算复杂,难以开展电性能快速评估、调控等问题,提出了一种最佳吻合下变形反射面天线电性能机电解耦计算方法. 以最佳吻合抛物面为基准,利用相位项二阶展开近似方法,将变形反射面相对最佳吻合面的结构变形信息从原有辐射积分运算中分离,进而将积分运算转换为矩阵相乘运算,实现了机电解耦,从而在保证计算精度的情况下,实现了最佳吻合状态下变形反射面天线电性能快速解耦运算.

2 机电解耦计算方法

2.1 最佳吻合与法向偏差

反射面天线在多源载荷作用下会产生结构变形,导致抛物面偏离设计曲面. 在天线设计中,往往采用最佳吻合抛物面运算,获得一个相对于设计抛物面顶点有移动、焦轴有转动、焦距有变化的最佳吻合抛物面. 在此情况下,结构变形相对最佳吻合面的偏差最小,将馈源移至新的焦点上,则电性能会有所改善^[19].

最佳吻合抛物面示意图如图2所示. 设原设计抛物面为A,坐标系为OXYZ,焦距为f,焦点为F,变形后的反射面为B;对于变形面B,总可以找到一个最佳吻合面BFP,使得结构变形相对最佳吻合面的偏差最小. 在原来设计面的坐标系下,设最佳吻合面BFP相对设计面A的顶点位移分别为 u_A, v_A, w_A ,按照右手螺旋定向的轴向转角为 ϕ_x, ϕ_y ,焦距增量为h,焦点为 F_1 ,最佳吻合面BFP具有相应的坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$.

结合设计面A的坐标关系,可建立最佳吻合面BFP相对设计面坐标系的方程为^[19]

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 + 2yz\phi_x - 2xz\phi_y - 2x(u_A + 2f\phi_y) \\ - 2y(v_A - 2f\phi_x) + 4fw_A - 4z(f+h) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中, x, y, z 为坐标分量; f 为设计面A的焦距; $u_A, v_A, w_A, \phi_x, \phi_y, h$ 依次为图2定义的最佳吻合面BFP相对于设计面的六个最佳吻合参数. 详细推导过程在诸多文献中均有描述,此处不再赘述.

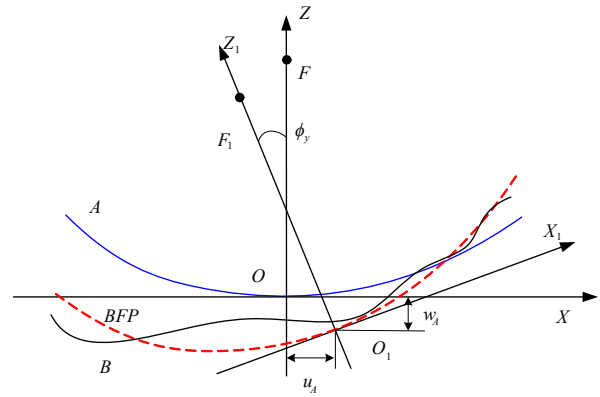


图2 最佳吻合面示意图

在实际工程中,尤其是大型地基反射面天线,在获得最佳吻合面后,将馈源或副面移动到最佳吻合面的焦点上,此时变形面相对最佳吻合面的偏差最小,能够改善相关电性能. 对于电性能运算而言,需要获得最佳吻合面相关参数,尤其是变形面相对最佳吻合面的偏差,用于进行电性能计算. 其关键难点在于,尽管设计面的参数是确定的,但最佳吻合面的参数是随着天线位姿、载荷情况变化的,这给电性能计算带来了较大困难,使得机电耦合计算繁琐复杂.

为了获得变形面B上任一点相对最佳吻合面BFP的法向偏差,结合电性能辐射积分运算的相关定义,保持与电性能运算一致,与传统天线结构设计不同,定义沿焦轴方向变化的偏差为正. 如图3所示,设计面A上任一点定义为 $P_0(x_0, y_0, z_0)$,对应的变形面B上的点为 P_1 ,点 P_1 相对 P_0 的结构位移为 (u, v, w) ,其是由结构有限元分析获得. 在吻合面BFP上, P_1 对应的点为 P_2 ,其中 P_1 相对 P_2 的法向偏差为 ε (注意:此处定义沿焦轴方向变形为正).

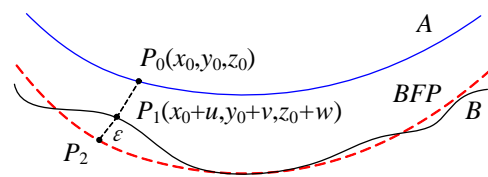


图3 变形面相对最佳吻合面的法向偏差

此时,最佳吻合面 P_2 点的坐标为

$$\begin{aligned} x &= x_0 + u - l\varepsilon \\ y &= y_0 + v - m\varepsilon \\ z &= z_0 + w - n\varepsilon \end{aligned} \quad (2)$$

其中, l, m, n 分别为设计面A上的法向方向余弦,考虑到天线结构微小变形的假设,法向方向余弦近似采用原设计面A上对应点进行计算.

将最佳吻合面 P_2 点坐标代入到最佳吻合面方程中,考虑结构微小变形,可得法向偏差的表达式为

$$\varepsilon = \frac{-1}{2\sqrt{f(f+z_0)}} \left[x_0(u-u_A) + y_0(v-v_A) - 2f(w-w_A) - 2hz_0 + y_0\phi_x(z_0+2f) - x_0\phi_y(z_0+2f) \right] \quad (3)$$

由于采用了沿焦轴方向变形为正的原则,虽然此处获得的法向偏差与传统天线结构设计符号不同,但此法向偏差正是电性能计算所需的正确输入值。

在获得法向偏差之后,按照传统天线结构设计,进行最佳吻合运算,可获得最佳吻合面 *BFP* 的相关参数,即 $u_A, v_A, w_A, \phi_x, \phi_y, h$ 六个吻合参数,进而获得每一点对应的法向偏差。详细推导过程在诸多天线结构设计文献中均有描述,此处不再赘述。

当最佳吻合面 *BFP* 与设计面 *A* 重合时,即六个吻合参数均为零,此时法向偏差可简化为

$$\varepsilon = \frac{-1}{2\sqrt{f(f+z_0)}} (x_0u + y_0v - 2fw) \quad (4)$$

此时表示天线产生变形后,反射面没有发生顶点移动、焦轴转动与焦距变化;仅在设计面 *A* 基础上有微小变形。更进一步,当仅有轴向 z 方向变化位移时,即 $u=0, v=0$, 则法向偏差退化为

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f}{f+z_0}} w = \cos \frac{\xi}{2} w \quad (5)$$

其中, ξ 表示设计面点 P_0 与焦点之间的夹角。此时表示天线变形后,仅在设计面 *A* 基础上产生了轴向偏差。以上公式即为法向偏差 ε 与轴向偏差 w 的运算关系式,用于仅存在轴向偏差时电性能计算、总体设计与相关误差分配。

为了后续电性能计算方便,将所有反射面上单元上点相对最佳吻合面的法向偏差写成立向量的形式。根据式(3),将六个最佳吻合参数写成立向量的形式,令:

$$\mathbf{D} = [u_A, v_A, w_A, h, \phi_x, \phi_y]^T \quad (6)$$

$$b_i = \frac{-1}{2\sqrt{f(f+z_{i,0})}} (x_{i,0}u_i + y_{i,0}v_i - 2fw_i) \quad (7)$$

$$c_i = \frac{1}{2\sqrt{f(f+z_{i,0})}} \left[x_{i,0}, y_{i,0}, -2f, 2z_{i,0}, -y_{i,0}(z_{i,0}+2f), x_{i,0}(z_{i,0}+2f) \right]^T \quad (8)$$

其中, \mathbf{D} 表示最佳吻合参数向量,下标 i 表示第 i 个点对应的数值,可将任一点法向偏差写为

$$\varepsilon_i = b_i + \mathbf{c}_i^T \mathbf{D} \quad (9)$$

至此,可将反射面上所有点相对最佳吻合面的法向偏差写成关于最佳吻合参数的矩阵形式:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} + \mathbf{C}\mathbf{D} \quad (10)$$

其中, $\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_M]^T$ 表示法向偏差列向量, M 表示反射面上参与运算的节点数量, $\mathbf{B} = [b_1, b_2, \dots, b_M]^T$, $\mathbf{C} =$

$[c_{11}, c_{12}, \dots, c_{1M}]^T$.

2.2 电性能机电解耦计算模型

在获得变形面相对吻合面法向偏差后,可进行天线的电性能计算。结合多源载荷对天线的影,更加关注的是在天线电气参数已定的情况下,如何实现多源载荷作用下变形面天线电性能的解耦计算,即将结构变形信息与电磁运算分离,进而提高变形面天线电性能运算效率。此举可实现相关电性能快速评估,为快速调控、补偿等提供技术基础。

对于变形反射面天线而言,其电性能方向图正比于口径场幅度分布函数的傅里叶变换^[8,17,22]:

$$E = \iint_s Q(\rho) e^{ik\rho \cdot \hat{r}} e^{i\delta} ds \quad (11)$$

其中, E 表示远区辐射电场; Q 表示口径场幅度分布函数; ρ 表示反射面上任一点的极坐标矢量; ρ 为其幅度值; k 为自由空间波常数; \hat{r} 为观察方向的单位矢量; s 为口径面积; δ 表示由于结构变形引入的附加相位项。

反射面上任一点的结构变形如图4所示,与之前定义保持一致, w 为轴向(z 向)变形, ε 为法向偏差, ξ 为反射面上任一点与焦点的夹角。

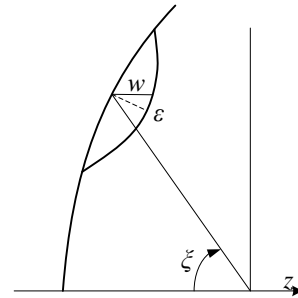


图4 反射面上任一点结构变形示意图

结合图4,在电性能运算中,结构变形引入的附加相位项可表示为^[17,22]

$$\delta = kw(1 + \cos \xi) = 2k\varepsilon \cos(\xi/2) \quad (12)$$

此表达式的获得,充分利用了法向偏差与轴向偏差之间的关系式(5)与三角函数的二倍角公式。

考虑到天线结构设计中采用法向偏差进行最佳吻合运算,结合前述最佳吻合面概念,采用法向偏差作为结构变形的输入。结合相关文献^[17],在结构小幅、缓变的情况下,可将附加相位项进行二阶级数展开,保留前两阶项,其计算精度能够满足均方根值误差在0.1倍工作波长时的计算要求^[17]。

附加相位项二阶展开后,可表示为

$$e^{j\delta} = e^{j2k\varepsilon \cos(\xi/2)} = 1 + j2k\varepsilon \cos(\xi/2) - k^2\varepsilon^2(1 + \cos \xi) \quad (13)$$

将此二阶展开后的相位项引入到电性能计算中,可得到:

$$\begin{aligned}
E &= E_0 + \iint_s Q(\rho) e^{jk\rho \cdot \hat{r}} j2k\varepsilon \cos(\xi/2) ds \\
&+ \iint_s Q(\rho) e^{jk\rho \cdot \hat{r}} [-2k^2\varepsilon^2 \cos^2(\xi/2)] ds \quad (14) \\
&= E_0 + E_1 + E_2
\end{aligned}$$

其中, E_0 表示当前最佳吻合抛物面未变形状态下对应的电性能; E_1 、 E_2 分别表示结构变形引入的一阶项、二阶项。

结合反射面天线电性能积分运算可以描述为众多单元上积分运算的叠加, 借鉴文献[22, 23]采用单元中点函数值描述单元上的运算, 可将一阶项、二阶项表示为

$$\begin{aligned}
E_1 &= \sum_{i=1}^M E_{1,i} = \sum_{i=1}^M Q(\rho_i) e^{jk\rho_i \cdot \hat{r}} j2k\varepsilon_i \cos(\xi_i/2) s_i \\
E_2 &= \sum_{i=1}^M E_{2,i} = \sum_{i=1}^M Q(\rho_i) e^{jk\rho_i \cdot \hat{r}} [-2k^2\varepsilon_i^2 \cos^2(\xi_i/2)] s_i \quad (15)
\end{aligned}$$

其中, M 表示单元数目; $E_{1,i}$ 、 $E_{2,i}$ 分别表示单元 i 上的一阶项、二阶项。

进一步, 可将法向偏差从以上运算中分离出来, 实现机电解耦, 则

$$\begin{aligned}
E_1 &= \sum_{i=1}^M G_i \varepsilon_i = \mathbf{G}^T \boldsymbol{\varepsilon} \\
E_2 &= \sum_{i=1}^M H_i \varepsilon_i^2 = \mathbf{H}^T \boldsymbol{\varepsilon}^2 \quad (16)
\end{aligned}$$

其中, $\mathbf{G}=[G_1, G_2, \dots, G_M]^T$ 、 $\mathbf{H}=[H_1, H_2, \dots, H_M]^T$ 分别表示一阶、二阶系数矩阵, $\boldsymbol{\varepsilon}^2=[\varepsilon_1^2, \varepsilon_2^2, \dots, \varepsilon_M^2]^T$ 表示法向偏差平方项列向量矢量。

一阶、二阶系数矩阵中的每一个元素可表示为

$$\begin{aligned}
G_i &= Q(\rho_i) e^{jk\rho_i \cdot \hat{r}} j2k \cos(\xi_i/2) s_i \\
H_i &= Q(\rho_i) e^{jk\rho_i \cdot \hat{r}} [-2k^2 \cos^2(\xi_i/2)] s_i \quad (17)
\end{aligned}$$

其中, G_i 、 H_i 分别表示第 i 个单元对应的一阶、二阶系数。由此可见, 一阶、二阶系数中仅仅包含口径场幅度分布值、单元坐标与相关口径面积等, 不再包含有误差、结构参数等结构信息, 从而为后续解耦模型的建立提供了便利。

在此基础上, 电性能解耦计算模型可描述为

$$E = E_0 + \mathbf{G}^T \boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{H}^T \boldsymbol{\varepsilon}^2 \quad (18)$$

可见, 通过公式推导, 将电性能表示为常数项、一阶项、二阶项的矩阵叠加形式。由于常数项 E_0 、一阶、二阶系数矩阵 \mathbf{G} 、 \mathbf{H} 中均不再包含结构误差等结构信息, 结构误差仅存在于法向偏差列向量 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 与其二阶项 $\boldsymbol{\varepsilon}^2$ 中, 因此, 实现了机械结构变形与电气运算的解耦, 即机电解耦运算。

将法向偏差列向量关于最佳吻合参数的表达式(10)代入以上电性能计算模型, 可得到变形反射面天线电性能关于最佳吻合参数的机电解耦计算模型:

$$E = E_0 + \mathbf{G}^T (\mathbf{B} + \mathbf{C}\mathbf{D}) + \mathbf{H}^T (\mathbf{B} + \mathbf{C}\mathbf{D})^2 \quad (19)$$

至此, 通过公式推导, 建立了变形反射面天线电性能机电解耦计算模型。由于一阶、二阶系数矩阵不包含结构变形, 当反射面天线电气参数确定后, 两个参数是确定的, 可提前存储起来。通过以上推导, 实现了结构变形从原有积分运算中分离, 达到了机电解耦的效果。当反射面天线电气参数确定后, 结合结构单元划分情况, 在进一步获得天线不同位姿、不同载荷作用下的结构变形后, 可通过调用此矩阵运算模型, 实现在最佳吻合下变形反射面天线电性能快速解耦计算。

2.3 模型对比

结合原有积分模型、文献[17, 18]的二阶展开模型, 所提解耦模型的主要区别在于: (1) 与文献[17, 18]的二阶展开模型相比, 解耦模型考虑了反射面天线在结构设计上的最佳吻合操作, 将变形反射面天线相对于最佳吻合面的法向偏差作为电性能输入, 以最佳吻合面为基准, 有效考虑了天线结构设计特点, 使得计算结果更具有可信性; (2) 与原有积分模型相比, 解耦模型将结构变形信息独立出电性能积分运算中, 实现了结构变形与电磁运算的解耦, 利用相对于最佳吻合面的法向偏差作为电性能输入, 保持了与天线结构最佳吻合操作的一致性, 通过调用矩阵运算, 可实现在最佳吻合下天线结构分析到电性能运算的无缝衔接与快速解耦。所提解耦模型的相关技术优势将通过后续相关算例进行验证。

3 仿真案例

3.1 仿真模型

以经典的 8 m 圆对称反射面天线为例^[19, 24], 天线口径 8 m, 焦距 3 m, 工作频率 30 GHz。电气参数输入采用口径场幅度分布函数, 边缘锥削为 -10 dB。口径场幅度分布函数按照下式^[22]:

$$Q(\rho) = B + C \left(1 - \frac{\rho^2}{a^2}\right)^P \quad (20)$$

其中, $B+C=1$, $ET=20\lg B$ 为边缘锥削, a 为口面半径, P 表示口径场分布控制参数, 在仿真中, $ET=-10$ dB, $P=1$ 。

采用背架结构支撑天线反射面, 天线桁架结构 1/4 部分示意图如图 5 所示。背架结构采用钢结构, 弹性模量 210 GPa, 密度 7 850 kg/m³; 反射面板为铝合金, 弹性模量 71 GPa, 密度 2 730 kg/m³。背架结构相关几何尺寸参数包括: 背架单片辐射梁上弦节点与焦轴距离 $r_1=0.6$ m、 $r_2=2$ m、 $r_3=3.2$ m、 $r_4=4$ m, 单片辐射梁上下弦节点间距 $h_1=0.9$ m、 $h_2=0.8$ m、 $h_3=0.3$ m、 $h_4=0.2$ m。背架钢结构采用实心圆柱建模, 梁截面按照文献[19, 24]分为 13 类, 其中每一类的半径分别为 7、8、10、7、7、7、10、8、8、8、10、8、3 mm。反射面板厚度为 4 mm。根据以上参

数建立天线结构有限元模型,并采用重力、横风进行载荷施加,实现电性能快速解耦运算的验证.

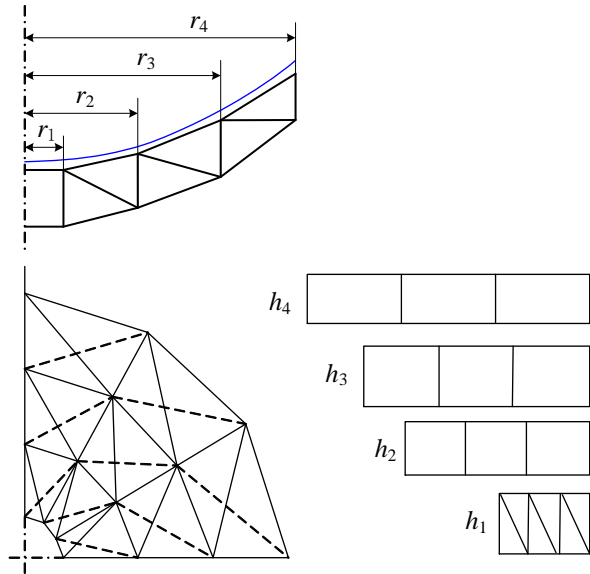


图5 某8 m天线桁架结构简图

考虑到与原有积分模型、文献[17,18]的二阶模型的对比,结合上述模型的适用范围,采用两步进行所提解耦模型的验证. 第一步,在反射面上施加假设的轴向变形,用于模拟与文献[17,18]相同的变形参数,可验证所提解耦模型在没有最佳吻合操作时,即在电气设计上的正确性与有效性;第二步,在反射面上施加真实的结构变形,包括重力与风载荷变形,用于验证所提解耦模型在结构最佳吻合操作后的正确性与有效性.

3.2 假设轴向变形

为了验证所提电性能快速解耦计算模型的正确性与有效性,首先按照电磁学科常用的分析方法,引入假设的轴向变形进行验证. 在这种情况下,法向偏差与轴向偏差符合两者的关系式(5),进而可采用文献[17,18]的二阶展开模型与所提解耦模型进行对比.

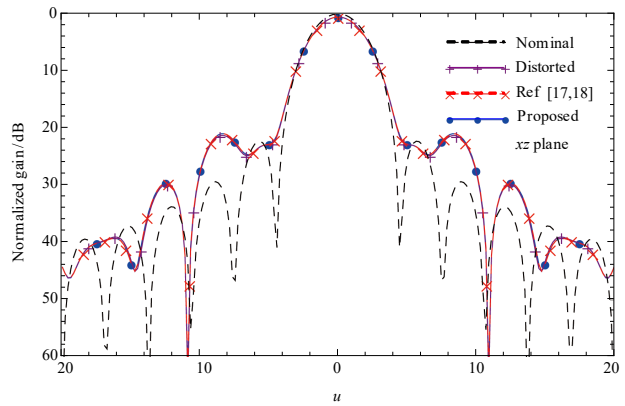
采用文献[17]中的三种结构变形信息进行电性能计算. 三种变形信息描述为^[17]

$$\begin{aligned} w_1 &= 0.05\lambda \sin(2\pi\rho^2/a^2) \\ w_2 &= 0.05\lambda \cos(10\pi\rho^2/a^2) \\ w_3 &= 0.05\lambda \cos[5\arctan(x/y)] \end{aligned} \quad (21)$$

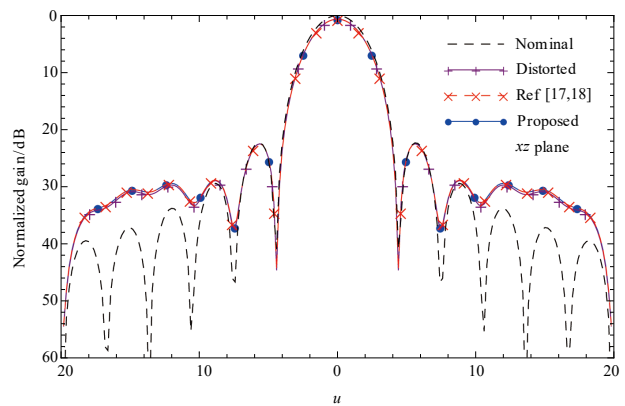
其中, λ 为工作波长.

为了验证所提模型的正确性,分别采用原有积分运算模型、文献[17,18]的二阶展开模型、所提解耦模型进行电性能方向图计算. 三种假设轴向变形情况下的方向图计算结果如图6所示,其中虚线表示设计抛物面理想状态下的电性能方向图(Nominal),用“+”标记的实线表示依靠积分运算模型获得的电性能方向图(Distorted),用“×”标记的虚线表示依靠文献[17,18]的二阶

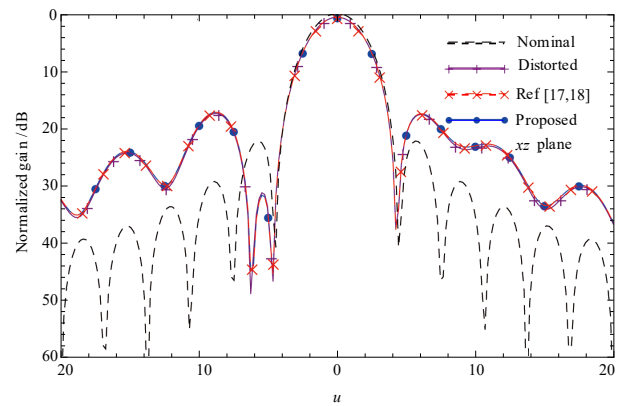
展开模型获得的电性能方向图^[17,18],用“•”标记的实线表示依靠所提解耦模型获得的电性能方向图(Proposed). 与此同时,选取主轴增益损失进行对比,三种假设轴向变形情况下的增益损失如表1所示.



(a) 变形1



(b) 变形2



(c) 变形3

图6 假设轴向变形情况下的天线电性能

从图6可见,相比原有积分运算模型、文献[17,18]的二阶展开模型,所提解耦模型在天线方向图主瓣及其近副瓣保持较优的吻合度. 从表1可见,在主轴增益

表1 三种假设轴向变形情况下的增益损失 单位: dB

项目	变形1	变形2	变形3
积分模型	-0.572	-0.637	-0.642
文献[17,18]	-0.578	-0.639	-0.655
所提模型	-0.578	-0.639	-0.655
与积分模型偏差	0.006	0.002	0.013

损失上,所提解耦模型可实现较优的计算精度.在三种假设轴向变形的情况下,与原有积分模型相比,主轴增益损失偏差最大值为0.013 dB;与文献[17,18]的二阶展开模型相比,主轴增益损失数值一致,说明了所提解耦模型的有效性与正确性.

在此假设轴向变形的情况下,变形反射面天线没有进行最佳吻合操作,文献[17,18]的二阶展开模型直接以此假设的轴向变形作为输入,所提解耦模型则采用与轴向变形成比例关系的法向偏差作为输入;因此在没有最佳吻合操作下,所提解耦模型与文献[17,18]的二阶展开模型的计算结果相同.

此外,为了体现所提解耦模型在计算时间上的优势,采用同一计算机硬软件进行运算.计算机配置:Win10操作系统、x64位处理器、内存32 GB,计算编程软件Mathematics7.0学生版.表2列出了三种假设轴向变形情况下的计算时间.从表2中可见,相比原有积分模型,所提解耦模型计算效率可提升95%左右.同时,相比于文献[17,18]的二阶展开模型,所提解耦模型计算时间也较为吻合.

表2 三种假设轴向变形情况下的计算时间

项目	变形1	变形2	变形3
积分模型/s	1.01	1.03	1.03
文献[17,18]/s	0.046	0.062	0.047
所提模型/s	0.047	0.063	0.047
占积分模型百分比/%	5.0	5.8	4.9

3.3 重力变形

考虑到不同仰角下,重力对天线结构变形影响不同,为此,从仰天至直平 90° 范围内,每间隔 5° ,生成不同仰角对应的重力变形信息,并进行此不同仰角重力变形下的电性能计算.对天线进行结构分析,提取结构变形,开展最佳吻合运算,获得最佳吻合参数与法向偏差,进而通过公式可计算天线电性能.

首先采用原有积分运算模型对处于不同仰天角度下的天线电性能进行计算.选择不同仰天角度下的最佳吻合面形作为基准,按照原有积分运算模型进行计算.图7为采用积分模型计算的重力载荷作用下不同仰角对应的方向图汇总图,其中虚线表示理想状态(Nominal)、实线表示变形状态(Distorted).由图7可知,由于重力对不同仰角下反射面变形的不对称性,在天

线仰角变化过程中,方向图逐渐出现了左右不对称现象.

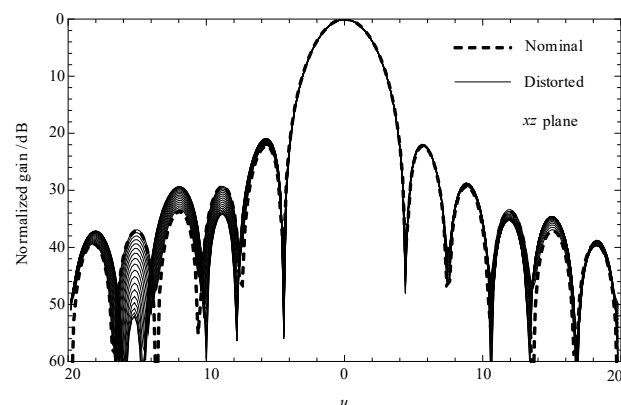
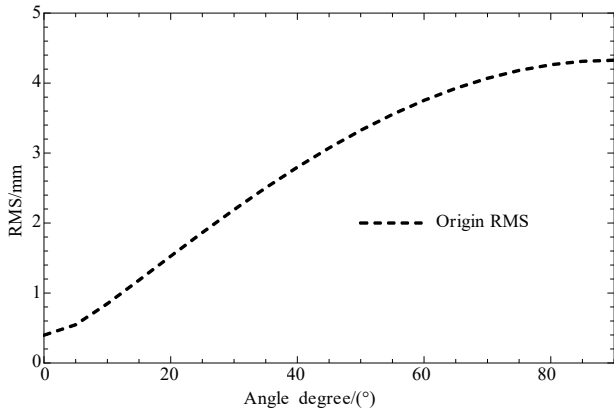


图7 采用积分模型计算的重力载荷作用下不同仰角对应的方向图汇总图

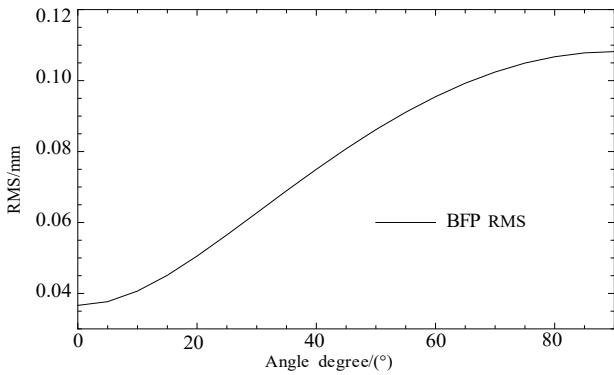
考虑到在天线结构设计中,采用最佳吻合操作将馈源或副面移动到最佳吻合面的焦点上,此时变形面相对最佳吻合面的偏差最小,能够改善相关载荷作用下的电性能.图8(a)和图8(b)分别为最佳吻合前与最佳吻合后天线面形精度(Root Mean Square, RMS)变化曲线,其中虚线表示原始未进行最佳吻合操作的面形精度(Origin RMS),实线表示进行最佳吻合操作之后的面形精度(BFP RMS).在最佳吻合操作之前,反射面原始面形精度随着仰角变化,从0.40 mm提升至4.33 mm(相当于工作波长的 $2/5$);在最佳吻合操作之后,反射面最佳吻合下的面形精度随着仰角变化,从0.04 mm提升至0.11 mm(相当于工作波长的 $1/100$).在最佳吻合操作下,将馈源或副面移动到最佳吻合面的焦点上,其电性能将得到改善.

选取处于最差工况即指平状态下的结构变形进行电性能分析.在指平状态下,重力变形幅度最大.采用所提解耦模型进行电性能分析,选取最佳吻合后的吻合参数与法向偏差作为输入.图9为重力载荷作用下最恶劣工况积分运算模型与所提解耦模型对应的方向图,其中曲线标识与图6相同.从图9可见,相比原有积分运算模型,所提解耦模型在天线方向图主瓣及其近副瓣也保持较优的吻合度.

为了进一步说明所提解耦模型在最佳吻合上的优势,选用文献[17,18]二阶展开模型与原有积分模型进行对比.图10为在重力载荷作用下最恶劣工况积分运算模型与文献[17,18]二阶展开模型对应的方向图,其中曲线标识与图6相同.从图10可见,相比原有积分运算模型,文献[17,18]二阶展开模型在天线方向图主瓣及其近副瓣出现了较大偏差.这是因为,在最恶劣工况下,没有进行最佳吻合操作的天线面形精度为4.33 mm,相当于工作波长的 $2/5$,此时面形精度已经超过了文献[17,18]二



(a) 原始未吻合精度



(b) 最佳吻合精度

图8 重力变形情况下的天线反射面面形精度

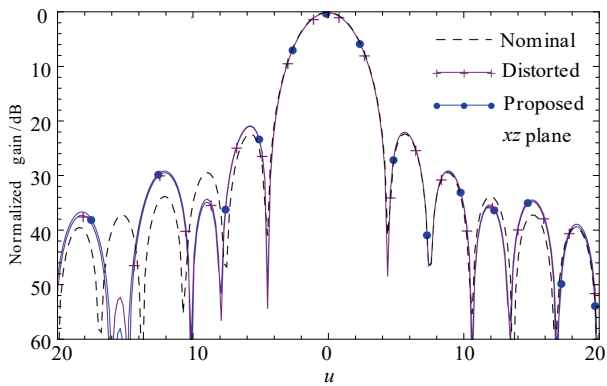


图9 重力载荷作用下最恶劣工况积分运算模型与所提解耦模型对应的方向图

阶展开模型的适用范围(0.1倍工作波长). 在这种情况下,文献[17,18]二阶展开模型已无法兼顾大变形情况下的电性能计算精度;与原有积分模型相比,文献[17,18]二阶展开模型的分析结果出现了较大偏差,不仅体现在主瓣增益,而且体现在方向图上. 此算例也充分说明了文献[17,18]二阶展开模型无法考虑天线结构最佳吻合操作,仅能适用于以理想设计抛物面为基准的电气设计阶段.

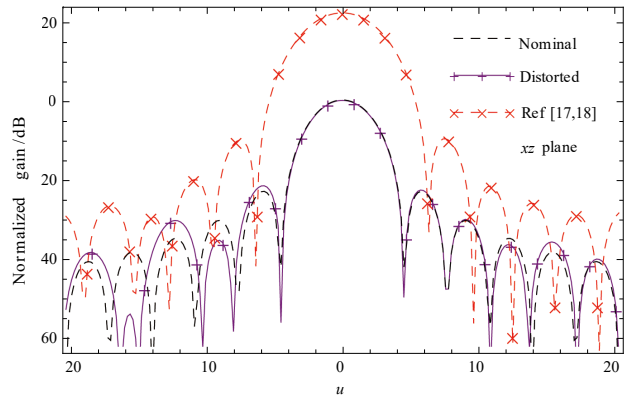
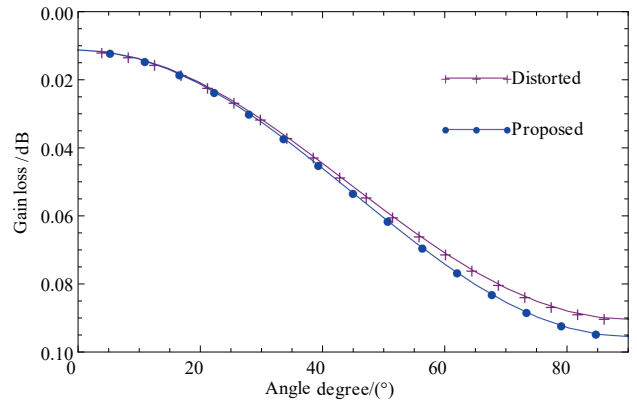
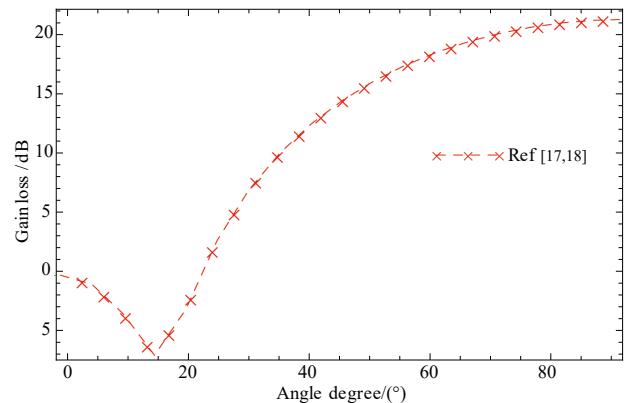


图10 重力载荷作用下最恶劣工况积分运算模型与文献[17,18]二阶展开模型对应的方向图

与此同时,针对原有积分运算模型、文献[17,18]二阶展开模型与所提解耦模型的具体数值对比,选取主轴增益损失随不同仰角的变化进行对比. 图11为重力载荷作用下不同仰角对应的增益损失变化曲线,其中图11(a)表示原有积分运算模型与所提解耦模型获得的数据,图11(b)为文献[17,18]二阶展开模型获得的数据,曲线标识与图10保持一致.



(a) 积分运算模型与所提解耦模型



(b) 文献[17,18]二阶展开模型

图11 重力载荷作用下不同仰角对应的增益损失变化曲线图

表3给出了重力载荷作用下最优与最差工况对应的面形精度与增益损失值,其中最优工况指的是天线仰天,最差工况指的是天线指平.

表3 重力载荷作用下最优与最差工况对应的面形精度与增益损失值

项目		最优工况	最差工况
面形精度	未吻合	0.40 mm	4.33 mm
	最佳吻合	0.04 mm	0.11 mm
增益损失	积分模型	-0.012 dB	-0.090 dB
	文献[17,18]	-0.047 dB	21.22 dB
	所提模型	-0.012 dB	-0.095 dB
	与积分模型偏差	—	0.005 dB

结合图8和表3可知,在经过最佳吻合运算后,最差工况的面形精度由4.33 mm降至0.11 mm,天线面形精度得到较大改善.结合图11和表3可知,由于无法兼顾最佳吻合运算,以理想状态为基准的文献[17,18]二阶展开模型在增益损失的计算上存在较大偏差,甚至出现了超过理想增益的情况,如图11与表3所示.同时,所提解耦模型与原有积分运算模型具有较好的吻合度,在最差工况下的增益损失偏差仅为0.005 dB,低于天线设计上0.1 dB的允许误差^[25],证明了所提解耦模型的有效性.

3.4 重力加风载荷

大口径反射面天线在地面状态下服役时,会受到风载荷影响.为此,引入横风载荷,正吹处于不同仰角下的天线反射面.

风载荷计算公式为

$$F_w = \frac{1}{2} C_d \rho_0 V^2 S \quad (22)$$

其中, F_w 表示风载荷作用力; C_d 表示气动阻力系数; $\rho_0=1.29 \text{ kg/m}^3$ 为空气密度; V 为风速; S 为天线口径面积.

在仿真中,设定风速为强风6级,风速为 $V=12 \text{ m/s}$,正吹的情况下气动阻力系数 $C_d=1.5$.按照此参数将风载荷施加在反射面上,获得重力与风载荷共同作用下的结构变形.

首先采用原有积分运算模型对处于不同仰天角度下的天线电性能进行计算.图12为采用积分模型计算的重力与风载荷同时作用下不同仰角对应的方向图汇总图,其中曲线标识与图7相同.由图12可知,由于重力与风载荷对不同仰角下反射面变形的不对称性,在天线仰角变化过程中,方向图也逐渐出现了左右不对称现象,且相比仅重力载荷,风载荷作用下的方向图偏差更加严重.

与前述仿真一致,对重力与风载荷共同作用下的天线反射面变形进行最佳吻合运算.图13(a)和图13(b)分别为重力与风载荷共同作用下的最佳吻合前与最佳吻合后天线面形精度(RMS)变化曲线,其中曲线标

识与图8相同.在最佳吻合操作之前,重力与风载荷共同作用下的反射面原始面形精度随着仰角变化,从4.55 mm提升至8.86 mm(相当于工作波长的9/10);在最佳吻合操作之后,反射面最佳吻合下的面形精度随着仰角变化,从0.12 mm提升至0.22 mm(相当于工作波长的1/50).在最佳吻合操作下,将馈源或副面移动到最佳吻合面的焦点上,其电性能将得到改善.

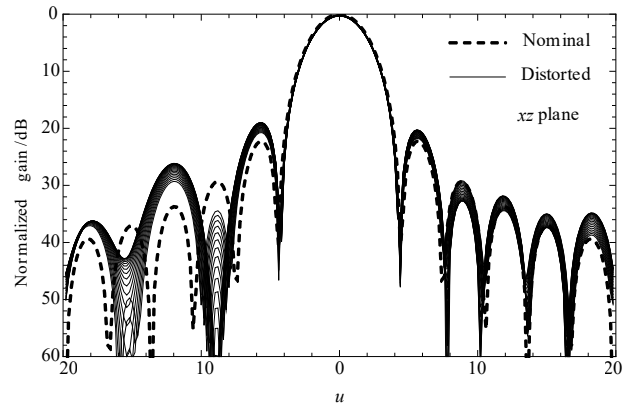
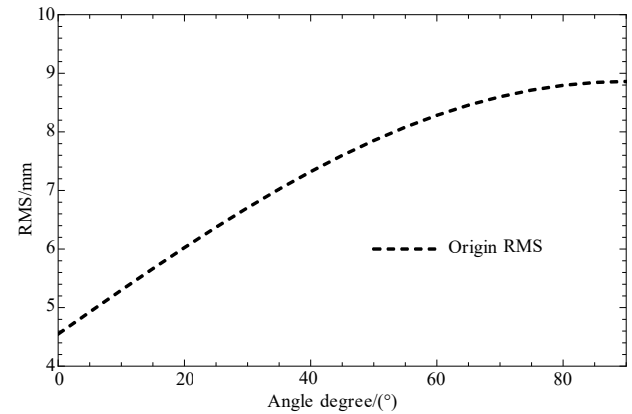
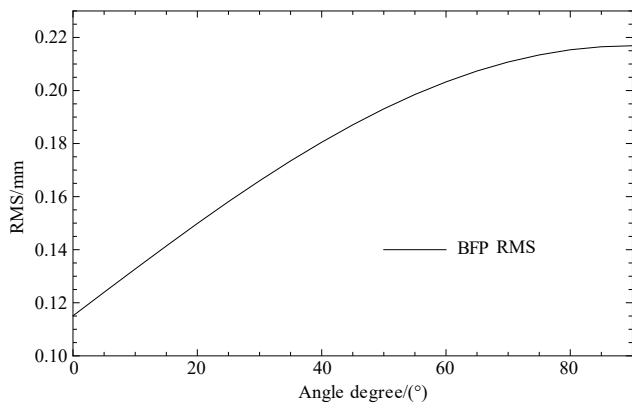


图12 采用积分模型计算的重力与风载荷共同作用下不同仰角对应的方向图汇总图



(a) 原始未吻合精度



(b) 最佳吻合精度

图13 重力与风载荷共同作用下的天线反射面面形精度

其次,选取处于最差工况即指平状态下的结构变形进行电性能分析.采用所提解耦模型进行电性能分析,选取最佳吻合后的吻合参数与法向偏差作为输入.图 14 为重力与风载荷共同作用下最恶劣工况积分运算模型与所提解耦模型对应的方向图,其中曲线标识与图 9 相同.从图 14 可见,相比原有积分运算模型,所提解耦模型在天线方向图主瓣及其近 2 个副瓣也保持较优的吻合度.

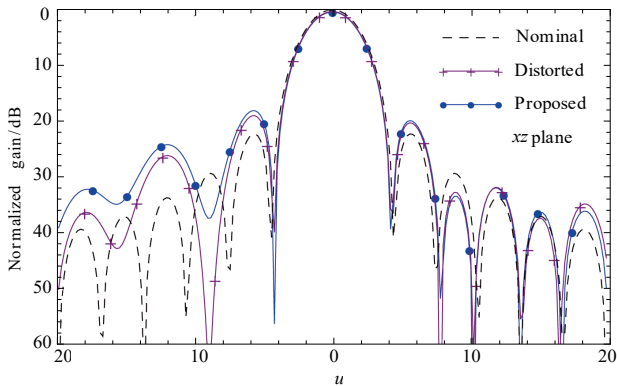


图 14 重力与风载荷共同作用下最恶劣工况积分运算模型与所提解耦模型对应的方向图

与前述仿真一致,在此重力与风载荷共同作用下,选用文献[17,18]二阶展开模型与原有积分模型进行对比.图 15 为在重力与风载荷共同作用下最恶劣工况积分运算模型与文献[17,18]二阶展开模型对应的方向图,其中曲线标识与图 6 相同.从图 15 可见,相比原有积分运算模型,文献[17,18]二阶展开模型在天线方向图主瓣及其近副瓣出现了较大偏差.这是因为,在最恶劣工况下,没有进行最佳吻合操作的天线面形精度为 8.86 mm,相当于工作波长的 9/10,此时面形精度已经超过了文献[17,18]二阶展开模型的适用范围(0.1倍工作波长).在这种情况下,文献[17,18]二阶展开模型已无法兼顾大变形情况下的电性能计算精度;此算例也充分说明了文献[17,18]二阶展开模型无法考虑天线结构最佳吻合操作,仅能适用于以理想设计抛物面为基准的电气设计阶段.

与此同时,针对原有积分运算模型、文献[17,18]二阶展开模型与所提解耦模型的具体数值对比,选取主轴增益损失随不同仰角的变化进行对比.图 16 为重力与风载荷共同作用下不同仰角对应的增益损失变化曲线图,其中图 16(a)表示原有积分运算模型与所提解耦模型获得的数据,图 16(b)为文献[17,18]二阶展开模型获得的数据,曲线标识与图 10 保持一致.

表 4 给出了重力与风载荷共同作用下最优与最差工况对应的面形精度与增益损失值,其中最优化工况指的是天线仰天,最差工况指的是天线指平.

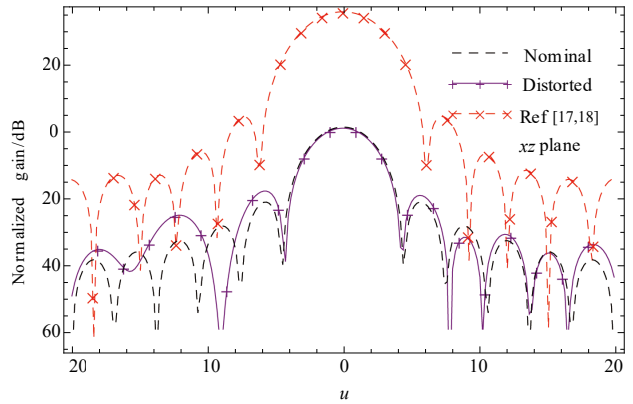
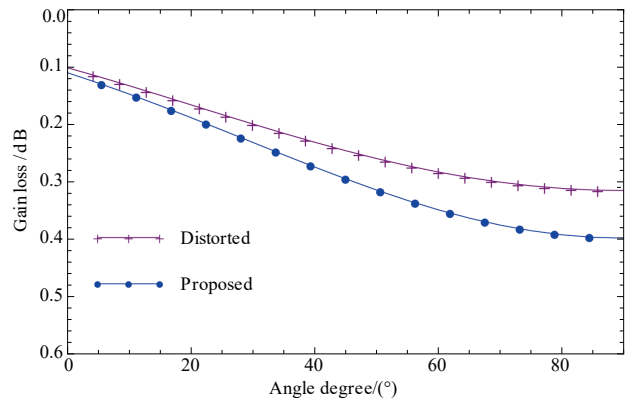
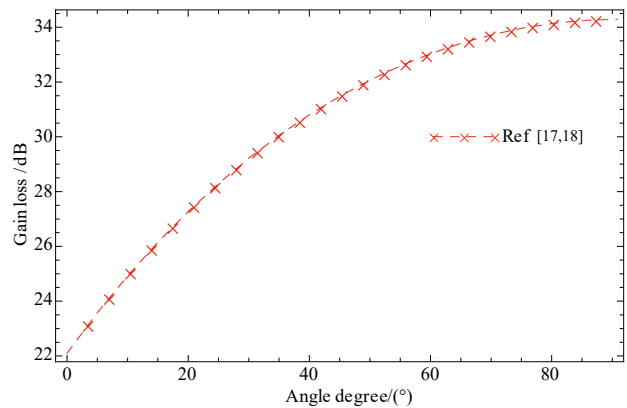


图 15 重力与风载荷共同作用下最恶劣工况积分运算模型与文献[17,18]二阶展开模型对应的方向图



(a) 积分运算模型与所提解耦模型



(b) 文献[17,18]二阶展开模型

图 16 重力与风载荷共同作用下不同仰角对应的增益损失变化曲线图

表 4 重力与风载荷共同作用下最优与最差工况对应的面形精度与增益损失值

工况	面形精度/mm		增益损失/dB			
	未吻合	最佳吻合	积分模型	文献[17,18]	所提模型	与积分模型偏差
最优工况	4.55	0.12	-0.105	22.19	-0.114	0.009
最差工况	8.86	0.22	-0.318	34.23	-0.401	0.083

结合图 13 和表 4 可知,在经过最佳吻合运算后,最差工况的面形精度由 8.86 mm 降至 0.22 mm,天线面形精度得到较大改善.结合图 16 和表 3 可知,由于无法兼顾最佳吻合运算,以理想状态为基准的文献[17,18]二阶展开模型在增益损失的计算上存在较大偏差,甚至出现了超过理想增益的情况,如图 16 与表 3 所示.同时,所提解耦模型与原有积分运算模型具有较好的吻合度,在最差工况下的增益损失偏差仅为 0.083 dB,低于天线设计上 0.1 dB 的允许误差^[25],再次证明了所提解耦模型的有效性.

3.5 计算时间对比

为了进一步验证重力与风载荷作用下的解耦模型在计算效率上的提升效果,表 5 列出了所有不同仰角下的结构变形对应的电性能运算时间.无论是重力载荷,还是重力加风载荷,相比于原有积分模型,所提解耦模型计算效率可提升 95%,这与前述结论相同.同时,结合文献[17,18]二阶展开模型计算时间,所提解耦模型在计算时间上与文献[17,18]二阶展开模型计算时间相近.

表 5 不同工况对应的计算时间

载荷	积分模型/s	文献[17,18]/s	所提模型/s	占积分模型百分比/%
重力载荷	19.547	0.641	0.704	3.6
重力加风载荷	16.469	0.640	0.688	4.2

3.6 讨论与潜在应用

结合以上假设轴向变形、重力与风载荷变形的相关仿真,可以从计算精度与计算时间上对所提解耦模型进行归纳:

(1)在计算精度上,所提解耦模型充分考虑了结构最佳吻合操作,与原有积分模型相比,能够达到相近的计算精度,最恶劣工况下的主轴增益偏差不超过 0.1 dB,满足工程设计要求;

(2)在计算时间上,所提解耦模型在文献[17,18]二阶展开模型的基础上,通过引入最佳吻合操作后的法向偏差作为输入,实现了结构分析到电磁运算的无缝衔接与快速解耦;

(3)所提解耦模型具备原有积分模型的计算精度,又具有文献[17,18]二阶展开模型的计算效率,即在保证计算精度的同时,提高了运算效率;

(4)由于无法考虑天线结构设计中的最佳吻合操作,文献[17,18]二阶展开模型无法适用于结构设计阶段,仅能适用于以理想设计抛物面为基准的电气设计阶段;

(5)所提解耦模型既可以适用于以理想设计抛物面为基准的电气设计阶段,也可以适用于最佳吻合操作的结构设计阶段.

表 6 给出了原有积分模型、文献[17,18]二阶展开模型、所提解耦模型的理论对比,其中对比内容包含:模型表达形式、结构输入、运算时间、最佳吻合适用情况与计算精度.表达形式用以对比三种运算模型的书写表达形式,结构输入用以对比采用法向、轴向偏差作为电性能运算的结构输入,运算时间用于对比计算耗时,最佳吻合适用情况用于对比在最佳吻合运算下的模型适用性,计算精度用于对比三种运算模型在结构变形下的计算准确性.

表 6 三种运算模型理论对比

模型	表达形式	结构输入	运算时间	最佳吻合适用情况	计算精度
原有积分模型	积分形式	法向偏差	长	适用	高
文献[17,18]	二阶展开	轴向偏差	短	不适用	适中 (仅轴向变形) 差(最佳吻合时)
所提解耦模型	二阶展开	法向偏差	短	适用	适中

结合表 6 的理论对比可知:原有积分模型采用积分形式,以法向偏差为结构输入,运算时间长,能够适用最佳吻合运算,具有较高的计算精度.文献[17,18]二阶展开模型采用二阶展开形式,以轴向偏差为结构输入,运算时间短,由于推导过程中没有考虑最佳吻合情况,不适用最佳吻合运算;当仅轴向变形时,具有适中的计算精度;当存在最佳吻合运算时,采用原有计算方式存在计算精度差的问题.所提解耦模型采用二阶展开形式,以法向偏差为结构输入,运算时间短,能够适用最佳吻合运算,具有适中的计算精度.

在服役环境下,反射面天线通过最佳吻合运算将馈源/副面移动至最佳吻合焦点上,进而降低载荷作用下的结构变形.在此最佳吻合情况下,对反射面天线的电性能评估,尤其是快速调控与补偿应用场景下,对电性能的快速运算提出了相关需求.所提机电解耦运算模型,可有效考虑反射面天线在载荷作用下的最佳吻合操作,达到了结构变形与电磁运算的分离,进而实现了最佳吻合下电性能快速解耦运算.

机电解耦运算模型的提出,对于大口径、高频段反射面天线服役状态下的实时检测评估、调控与补偿带来了较大的技术优势.利用此机电解耦模型,可以快速达到恶化电性能的评估,从而降低运算时间,能够为实时调控与补偿带来可能.与此同时,所提机电解耦模型还可以用于对恶化电性能方向图的结构反演,通过机电解耦运算,可从恶化的方向图,反推出结构变形,进而指导结构改进、故障诊断与装备抢救等应用.

4 结论

针对反射面天线在服役环境下受多源载荷因素影响导致电性能恶化,采用机电耦合运算繁琐复杂,难以开展快速评估、调控与补偿的问题,建立了最佳吻合下变形反射面天线电性能解耦计算模型,达到了结构变形与电磁运算的分离与机电解耦,进而实现了最佳吻合下电性能快速解耦运算.与原有积分运算模型相比,在计算精度上,所提机电解耦模型在天线方向图主瓣及其近副瓣保持较优的吻合度,可以保障小幅、缓变结构误差下的天线电性能计算精度;在计算时间上,所提机电解耦模型可使计算效率提升 95% 左右,有利于后续变形反射面天线电性能快速评估、调控与补偿.

参考文献

- [1] 李佩弦, 顾鹏飞, 包华广, 等. 基于特征模的宽带高增益超表面天线设计[J]. 电子学报, 2024, 52(12): 3931-3940.
LI P X, GU P F, BAO H G, et al. Design of broadband and high gain metasurface antenna based on characteristic mode analysis[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(12): 3931-3940. (in Chinese)
- [2] ZHANG Y, LI G P, ZHOU G H, et al. Real-time closed-loop active surface technology of a large radio telescope[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2022, 134(1031): 015003.
- [3] 程晓, 于海锋, 王晓蕾, 等. 反射面天线体制 SAR 卫星多角度成像姿态控制策略[J]. 航天器工程, 2023, 32(4): 42-46.
CHENG X, YU H F, WANG X L, et al. Attitude control strategy for multi-aspect imaging of SAR satellite with reflector antenna system[J]. Spacecraft Engineering, 2023, 32(4): 42-46. (in Chinese)
- [4] DUAN B Y, ZHANG S X. Electromechanical Coupling Theory, Methodology and Applications for High-Performance Microwave Equipment[M]. New Jersey: Wiley, 2022.
- [5] DONG J, ZHONG W Y, WANG J Q, et al. Correcting gravitational deformation at the Tianma radio telescope[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(4): 2044-2048.
- [6] 付丽, 王宇飞, 钱宏亮. 平均风作用对天马望远镜面形精度和指向精度的影响[J]. 天文学进展, 2019, 37(2): 187-202.
FU L, WANG Y F, QIAN H L. The effect of mean wind power on antenna surface accuracy and pointing accuracy of the Tian ma telescope[J]. Progress in Astronomy, 2019, 37(2): 187-202. (in Chinese)
- [7] LI S, HAN B Q, LIU S Y, et al. Simulation-driven wind load analysis and prediction for large steerable radio telescopes[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2023, 23(2): 18-72.
- [8] 段宝岩. 电子装备机电耦合理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
DUAN B Y. Theory, Method And Application of Electro-mechanical Coupling of Electronic Equipment[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [9] 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 B Y, WANG M. 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)
- [10] 王伟, 王祖铎, 顾原冰, 等. 变形双反射面天线的机电耦合分析方法[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54(1): 102-111.
WANG W, WANG Z H, GU Y B, et al. Electromechanical coupling analysis method of deformed dual-reflector antennas[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2024, 54(1): 102-111. (in Chinese)
- [11] 王从思, 肖岚, 项斌斌, 等. 大型射电望远镜天线主动面补偿研究进展[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47(5): 19-34.
WANG C S, XIAO L, XIANG B B, et al. Development of active surface technology of large radio telescope antennas[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2017, 47(5): 19-34. (in Chinese)
- [12] 王伟, 顾原冰, 王祖铎, 等. 反射面天线全路径机电耦合建模与补偿研究综述[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54(1): 6-22.
WANG W, GU Y B, WANG Z H, et al. A review of full-path electromechanical coupling modeling and compensation for reflector antennas[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2024, 54(1): 6-22. (in Chinese)
- [13] 班友, 高涛, 王娜, 等. 基于简化促动器的 QTT 天线主动主反射体结构建模及分析方法[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54(1): 79-88.
BAN Y, GAO T, WANG N, et al. Structural modeling and analysis method of the active main reflector of the Qitai radio telescope based on a simplified actuator[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2024, 54(1): 79-88. (in Chinese)
- [14] 王楠, 郎宇, 禹卫东, 等. 相控阵馈源反射面天线在星载

- SAR中的应用[J]. 航天器工程, 2024, 33(4): 11-17.
- WANG N, LANG Y, YU W D, et al. Application of phased array feed reflector antenna in spaceborne SAR[J]. Spacecraft Engineering, 2024, 33(4): 11-17. (in Chinese)
- [15] MA J, WU Y, XIAO S, et al. Design of the cryogenic system of the wideband phased array feed for QTT[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2021, 21(4): 88.
- [16] 牛晟璞, 孔德庆, 伍洋. 基于相控阵馈源的射电望远镜结构扰动补偿研究[C]//第十八届全国电波传播年会议论文集. 北京: 中国电子学会, 2023: 368-371.
- NIU S P, KONG D Q, WU Y. Research on structure disturbance compensation of radio telescope based on phased array feed[C]//Chinese National Symposium on Radio Propagation (CNSRP). Beijing: Chinese Institute of Electronics, 2023: 368-371. (in Chinese)
- [17] SMITH W T, BASTIAN R J. An approximation of the radiation integral for distorted reflector antennas using surface-error decomposition[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45(1): 5-10.
- [18] ZHANG S X, DUAN B Y. Random error characterization of nonsmooth parabolic reflector antennas with gore-faceted or discontinuous surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(4): 1922-1930.
- [19] 段宝岩. 天线结构分析、优化与测量[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.
- DUAN B Y. Analysis, Optimization and Measurement of Antenna Structure[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1998. (in Chinese)
- [20] CHONI Y, DARDYMOV A. Reducing set of parameters of the best-fit paraboloid at electronic compensation for thermal distortion of a satellite hybrid antenna reflector[C]//2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference. Piscataway: IEEE, 2023: 121-124.
- [21] CHONI Y I, DARDYMOV A V. Reconstruction of a distorted reflector of a large hybrid satellite antenna by processing its signals from a terrestrial source[C]//2022 Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems. Piscataway: IEEE, 2022: 1-5.
- [22] RAHMAT-SAMII Y. An efficient computational method for characterizing the effects of random surface errors on the average power pattern of reflectors[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1983, 31(1): 92-98.
- [23] BAHADORI K, RAHMAT-SAMII Y. 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.
- [24] 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 P, ZHENG F, DUAN B Y. Electromechanical coupling optimization design of reflector antennas including feed position error[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(6): 1377-1382. (in Chinese)
- [25] IP H P, RAHMAT-SAMII Y. Analysis and characterization of multilayered reflector antennas: Rain/snow accumulation and deployable membrane[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(11): 1593-1605.

作者简介



张树新 男, 1987年3月出生于河北省深州市. 现为西安电子科技大学教授、博士生导师. 主要研究方向为柔性可展开天线/结构机电耦合、机电集成设计与制造等. 中国电子学会会员编号: E190013497M.
E-mail: zhangshuxindd@126.com



梁昌艺 男, 1999年4月出生于山东省肥城市. 现为西安电子科技大学机电工程学院博士研究生. 主要研究方向为反射面天线结构设计、故障诊断.
E-mail: liangchangyi99@163.com