

面板位置误差对反射面天线功率方向图的影响机理

王伟, 李鹏, 宋立伟

(西安电子科技大学机电科技研究所, 陕西 西安 710071)

摘要: 根据反射面天线分块面板的结构特点, 推导出了面板位置误差与天线口面相位误差之间的转换矩阵。在此基础上, 研究了分块面板的平移和倾斜对于天线功率方向图的影响机理。选择由3圈面板拼装而成的反射面天线进行案例分析, 数值仿真结果与实测数据比较显示, 相对误差小于10%, 该误差转换矩阵可应用于实际天线工程中电性能的估算以及表面精度调整等。

关键词: 反射面天线; 影响机理; 面板位置误差; 功率方向图; 误差转换矩阵

中图分类号: TN820 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2009)04-0708-06

Mechanism of the influence of the panel positional error on the power pattern of large reflector antennas

WANG Wei, LI Peng, SONG Li-wei

(Research Inst. of Mechatronics, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: The errors associated with a segmented reflector limit the electrical performance obtainable with those antennas. In order to determine realistic error budgets for such antennas, approximate expressions for ETM (Error Transformation Matrix) between panel positional errors and aperture phase errors are derived. Base on the ETM, the mechanism of the influence of the panel positional errors on the power pattern of a reflector antenna with 3-ring panels is studied. It is found by comparing simulation with experimental data that the error is less than 10%. Thus the ETM may be applied to antennas with realistic panel schemes for the prediction of electrical performance and panel adjustment.

Key Words: reflector antenna; influence mechanism; panel positional error; power pattern; error transformation matrix

反射面天线广泛应用于通信、雷达、射电天文等领域。随着科学技术的发展, 反射面天线正面临着大口径和高精度的迫切要求^[1]。现有的加工工艺手段对较小尺寸的面板精度可提供一定保证, 但仍无法完成大型抛物曲面的整体成形加工。因此, 目前多数大型反射面天线都是采用分块面板拼装的形式来实现的。在拼装过程中受技术水平的限制势必会存在安装位置误差, 使得实际曲面不能完全与设计抛物面重合。

反射面天线通常工作在较高的频段, 其辐射特性受各种误差源的影响都比较大, 这些误差源主要包括天线面板的安装位置误差和反射面板的加工误差等随机误差, 以及由于重力、风荷、雨雪等载荷作用所导致的天线结构变形系统误差^[2-3]。系统误差是可以预测的, 通常是俯仰角的函数, 并可通过保型设计来减小或消除。面板加工误差随着加工工艺水平的提高一般可以达到要求, 可以忽略不计。安装位置误差是必须要关心的误差。过高的精度要求虽可以保证天线的工作性能, 但会使得其成本大大提高, 甚至出现受技术水平和实际工作环境限制、无法满足给定精度要求的情况。因此, 有必要分析各种误差源对天线工作性能的影响机理^[4], 并根据实际情况给出最佳面板调整量, 减小安装位置误差对电性能的影响^[5]。

笔者根据反射面天线分块面板的结构特点, 推导出了面板位置误差与天线口径面相位误差之间的转换矩阵, 以天线的平均功率方向图为研究对象, 通过数值计算方法分析了面板位置误差对电性能的影响关系,

收稿日期: 2008-10-19

基金项目: 国家安全重大基础研究计划项目资助(61358)

作者简介: 王伟(1980-), 男, 西安电子科技大学博士研究生, E-mail: vicent2009@gmail.com.

选择多圈面板反射面天线进行了仿真实验,给出了相关结果数据和曲线,为天线反射面的电性能估算与面板调整提供了指导.

1 误差转换矩阵的构造

大型反射面天线由于口径较大很难整体加工成形,通常是由很多块四边形面板拼装而成(如图 1),每块面板与背架上的 4 个支撑点通过螺栓连接,支撑点也是此面板的安装调整点.由于测量与调整设备的精度限制以及各种人为因素,使得面板的空间位置不能处于理想的状态,有可能会偏离设计曲面.支撑点处的偏移量导致了表面节点相对于理论曲面的误差,它们之间存在着一定的关系.因为面板的加工制造误差往往远小于天线背架变形,所以在天线安装工作过程中,各面板形状固定且可以近似为刚体^[6].



图 1 12 m 分块反射面天线 ALMA

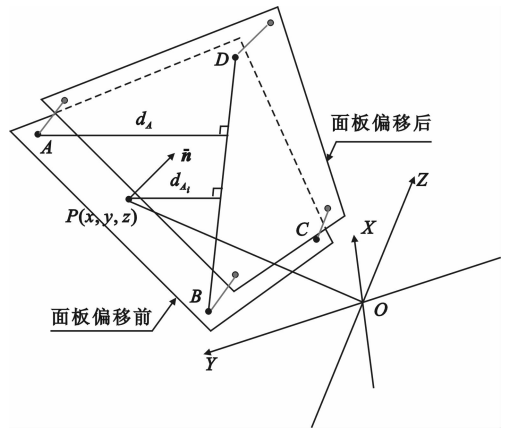


图 2 面板偏移示意图

1.1 面板偏移量与表面节点位置的关系

若假设面板为刚体,安装时选择 3 个支撑点即可对面板进行定位,第 4 个支撑点作为加固之用,可根据 3 个支撑点的偏移量来定义面板的空间位置误差.若支撑点 A 法向的偏移量为 a_A ,则面板上节点 $P_i(x, y, z)$ 同样有一个法向偏移量,记为 $\delta_{A_i}^n$,其量值正比与该点到旋转轴 BD 的距离,用公式描述为

$$\delta_{A_i}^n = \text{sign}_{A_i}(d_{A_i}/d_A)a_A \quad (1)$$

其中 sign_{A_i} 为符号函数; d_{A_i} 为节点 $P_i(x, y, z)$ 到直线 BD 的距离; d_A 为 A 到 BD 的距离.

符号函数 sign_{A_i} 取决于 P_i 和 A 点的相对位置.当节点 P_i 和安装点 A 处于直线 BD 的同侧时, P_i 的法向偏移量 $\delta_{A_i}^n$ 与 A 点偏移量 a_A 同号;反之,当 P_i 点和 A 点处于 BD 异侧时, $\delta_{A_i}^n$ 与 a_A 异号.可表述为

$$\text{sign}_{A_i} = \begin{cases} +1 & , \quad P_i \text{ 与 } A \text{ 在旋转轴同侧,} \\ -1 & , \quad P_i \text{ 与 } A \text{ 在旋转轴异侧.} \end{cases}$$

根据同样的规则,支撑点 B, C 分别沿法向偏移 a_B, a_C 时,同理可得表面采样节点 $P_i(x, y, z)$ 因牵连所产生的法向偏移量分别为

$$\delta_{B_i}^n = \text{sign}_{B_i}(d_{B_i}/d_B)a_B \quad (2)$$

$$\delta_{C_i}^n = \text{sign}_{C_i}(d_{C_i}/d_C)a_C \quad (3)$$

综上所述,面板总的偏移效果就是 A, B, C 3 个支撑点沿法向依次分别偏移 a_A, a_B 和 a_C 的合成.然而每个支撑点偏移时,点 $P_i(x, y, z)$ 偏移的矢量方向不尽相同,所以总的偏移量不能简单的叠加,而要取决于该点的法向方向矢量.

设 3 个支撑点都有偏移时, $P_i(x, y, z)$ 点处的单位方向矢量分别为 $\tilde{n}_A, \tilde{n}_B, \tilde{n}_C \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$.面板偏移之后表面节点 $P_i(x, y, z)$ 的新坐标为 $P_i'(x, y, z)$, 则

$$\mathbf{O}_{P_i'} = \mathbf{O}_{P_i} + \delta_{A_i}^n \cdot \tilde{n}_A + \delta_{B_i}^n \cdot \tilde{n}_B + \delta_{C_i}^n \cdot \tilde{n}_C \quad (4)$$

其中 $\mathbf{O}_{P_i'}, \mathbf{O}_{P_i} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 分别为从设计坐标系原点 $O(0, 0, 0)$ 到节点 $P_i(x, y, z), P_i'(x, y, z)$ 的位置矢量.将式

(1)~(3)分别带入式(4),则化简整理写成矩阵形式为

$$\begin{aligned} \mathbf{O}_{P_i'} &= \mathbf{O}_{P_i} + \delta_{A_i}^n \cdot \tilde{\mathbf{n}}_A + \delta_{B_i}^n \cdot \tilde{\mathbf{n}}_B + \delta_{C_i}^n \cdot \tilde{\mathbf{n}}_C = \\ & \mathbf{O}_{P_i} + \text{sign}_{A_i} \cdot \frac{d_{A_i}}{d_A} \cdot a_A \cdot \tilde{\mathbf{n}}_A + \text{sign}_{B_i} \cdot \frac{d_{B_i}}{d_B} \cdot a_B \cdot \tilde{\mathbf{n}}_B + \text{sign}_{C_i} \cdot \frac{d_{C_i}}{d_C} \cdot a_C \cdot \tilde{\mathbf{n}}_C = \\ & \mathbf{O}_{P_i} + \left[\text{sign}_{A_i} \frac{d_{A_i}}{d_A} \tilde{\mathbf{n}}_A, \text{sign}_{B_i} \frac{d_{B_i}}{d_B} \tilde{\mathbf{n}}_B, \text{sign}_{C_i} \frac{d_{C_i}}{d_C} \tilde{\mathbf{n}}_C \right] \cdot \begin{bmatrix} a_A \\ a_B \\ a_C \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

至此推导出了某块面板的 3 个支撑点分别沿法向偏移 a_A, a_B, a_C 后面板上节点 $P_i(x, y, z)$ 所对应的新坐标 $P_i'(x, y, z)$. 如 $P_i(x, y, z)$ 为天线面板上的任意节点, 则式(5)反映了面板支撑点偏移量与表面节点位置之间的关系.

1.2 面板偏移量与口面相位误差的关系

天线面板上某节点相对于设计目标面的半光程差为法向偏差的轴向分量^[7], 即

$$\epsilon_i = \hat{n}_z (\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{u}) \quad (6)$$

此处 $\hat{\mathbf{n}} = [\hat{n}_x, \hat{n}_y, \hat{n}_z]$ 指节点处的单位法向量, $\mathbf{u} = [u, v, w]$ 指面板上的节点相对于设计目标面的偏移向量.

设 ϵ_0 为偏移之前节点 $P_i(x, y, z)$ 相对于设计目标面的半光程差; ϵ 为偏移之后该节点的半光程差, 则由式(5)和式(6)可得

$$\epsilon = \epsilon_0 + \hat{n}_z \cdot \hat{\mathbf{n}} \cdot \left[\text{sign}_{A_i} \frac{d_{A_i}}{d_A} \tilde{\mathbf{n}}_A, \text{sign}_{B_i} \frac{d_{B_i}}{d_B} \tilde{\mathbf{n}}_B, \text{sign}_{C_i} \frac{d_{C_i}}{d_C} \tilde{\mathbf{n}}_C \right] \cdot \begin{bmatrix} a_A \\ a_B \\ a_C \end{bmatrix}. \quad (7)$$

对于第 k 块面板, 设 $\mathbf{B}_i^k = \hat{n}_z \cdot \hat{\mathbf{n}} \cdot \left[\text{sign}_{A_i} \frac{d_{A_i}}{d_A} \tilde{\mathbf{n}}_A, \text{sign}_{B_i} \frac{d_{B_i}}{d_B} \tilde{\mathbf{n}}_B, \text{sign}_{C_i} \frac{d_{C_i}}{d_C} \tilde{\mathbf{n}}_C \right]$, $\mathbf{a}^k = [a_A, a_B, a_C]^T$, 则式(7)可简写为

$$\epsilon_i^k = \epsilon_0^k + \mathbf{B}_i^k \cdot \mathbf{a}^k,$$

其中 ϵ_i^k 为第 k 块面板的支撑点偏移后, 面板上第 i 个节点的半光程差; \mathbf{B}_i^k 为的 k 块面板的偏移量与该板上第 i 个节点误差的转换矩阵; \mathbf{a}^k 为第 k 块面板的偏移向量.

1.3 整面误差转换矩阵

设天线反射面共有 N 块面板; 第 k 块面板有 N_k 个节点. 则对于单块面板上 N_k 个节点有 $\boldsymbol{\epsilon}^k = [\epsilon_1^k, \epsilon_2^k, \dots, \epsilon_{N_k}^k]^T$, $\mathbf{B}^k = [\mathbf{B}_1^k, \mathbf{B}_2^k, \dots, \mathbf{B}_{N_k}^k]^T$, 所以 $\boldsymbol{\epsilon}^k = \boldsymbol{\epsilon}_0^k + \mathbf{B}^k \cdot \mathbf{a}^k$.

对于整个天线反射面的所有面板, 因为 $\boldsymbol{\epsilon} = [\boldsymbol{\epsilon}^1, \boldsymbol{\epsilon}^2, \dots, \boldsymbol{\epsilon}^N]^T$, 并记 $\mathbf{a} = [\mathbf{a}^1, \mathbf{a}^2, \dots, \mathbf{a}^N]^T$,

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}^1 & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}^2 & \dots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{B}^N \end{bmatrix}, \text{ 所以}$$

$$\boldsymbol{\epsilon} = \boldsymbol{\epsilon}_0 + \mathbf{Q}\mathbf{a}, \quad (8)$$

其中 $\boldsymbol{\epsilon} = \{\epsilon_i\}$ 为面板偏移后所有表面节点相对于设计目标面的半光程差值向量; $\boldsymbol{\epsilon}_0$ 为面板偏移前表面节点的半光程差向量; \mathbf{Q} 为联系偏移量和表面节点误差的整体转换矩阵, 其对角分块矩阵为相应的单块面板的转换矩阵 \mathbf{B}^k ; $\mathbf{a} = \{a_j\}$ 代表定义在支撑点编号 j 之上的面板偏移向量.

表面节点误差与口面相位误差的关系为

$$\delta_i = (4\pi/\lambda)\epsilon_i. \quad (9)$$

假设面板偏移之前处于理想位置, 则所有面板的位置误差与口面相位误差的关系为

$$\boldsymbol{\delta} = \mathbf{Q}'\mathbf{a}, \quad (10)$$

其中 \mathbf{Q}' 为整个反射面所有面板位置误差与口面相位误差的整体转换矩阵.

2 天线电性能计算

分块反射面天线的面板位置误差可以有两种表示形式,一种是天线反射表面本身变形的均方根误差,另一种则是反映其对口面相位分布影响的相位均方根误差.鲁兹(Ruze)给出了一个公式可以比较有效的确定表面误差对天线增益损失的影响.在他的研究中,假设若两采样点之间距离超过某相关长度,其随机表面误差则认为是相互独立的,并且所有采样点处的随机误差都是服从正态分布的^[8].

利用上述推导出的误差转换矩阵,可以得到由面板位置误差所导致的口面相位误差 δ . 设口面上采样点处的相位误差定义为 $\delta(\rho', \phi')$, 根据口径面积分方法^[9], 天线的远区电场可由式(11)计算得到

$$E = \iint_A f(\rho', \phi') \exp(j\delta) \exp(jk\rho' \cdot \hat{r}) ds' \quad (11)$$

其中,函数 $f(\rho', \phi')$ 为口面上的理论电场分布.然而连续的口面误差方程 $\delta(\rho', \phi')$ 不可能得到.对应于天线反射表面,口径面也可以分成 N 个扇形区域,每个扇形区域又可以细分为 K 个单元,而每个单元则代表着一个相位误差,如图 3 所示.假设整个口径面分为 M 个等尺寸的小单元,式(11)的积分就可以写成求和的形式^[10]

$$E(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{K_n} E_{n,i} \exp(j\delta_{n,i}) \quad (12)$$

其中 $E_i(\theta, \phi) = f(\rho'_i, \phi'_i) \exp(jk\rho'_i \sin\theta \cos(\phi - \phi'_i)) \Delta s_i$, Δs_i 为第 i 个小单元的面积.那么根据式(12)和式(13),天线的功率方向图可以表示为

$$P = EE^* = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{K_n} \sum_{m=1}^N \sum_{l=1}^{K_m} E_{n,i} E_{m,l}^* \exp[j(\delta_{n,i} - \delta_{m,l})] \quad (14)$$

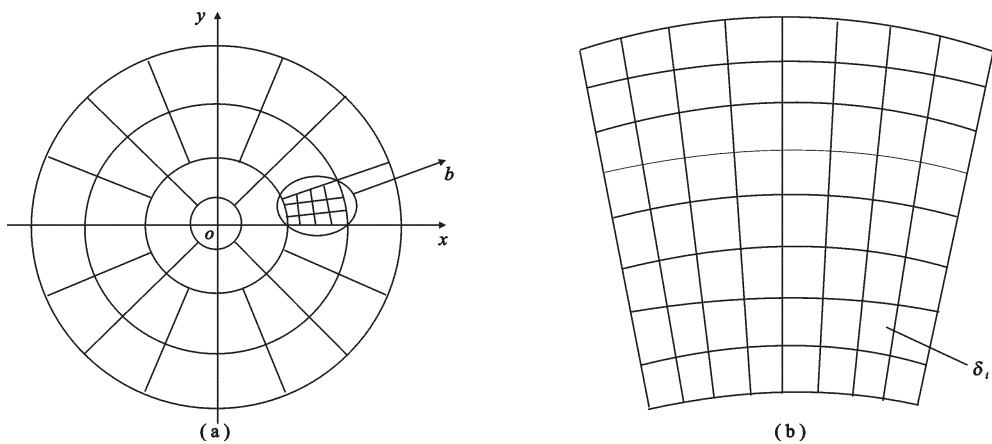


图 3 具有 3 圈面板的反射面天线口面单元划分示意图

3 数值仿真与分析

为了检验上述公式推导的正确性,这里设计了一个仿真案例.案例选择一口径为 6 m 的主焦反射面天线,其反射体由 3 圈分块面板组成.实际计算过程中考虑了平移和倾斜两种类型的面板位置误差.为了便于推导与计算,把平移和倾斜所产生的面板位置误差表示成面板上 3 个支撑点处的法向偏移量,记为 $\mathbf{a} = \{a_A, a_B, a_C\}$.对于面板倾斜的情况,3 个平移量不全相等.而位于不同圈上的面板,其位置误差为两种类型误差的组合.通过计算,给出了口面采样点处的相位误差以及对应的电性能.

将无面板偏移时和部分面板法向偏移 3 mm 时仿真计算结果与实测数据进行了比较,如表 1 所示,以实测为基准,仿真计算结果的相对误差小于 10%.

表 1 天线电性能参数仿真计算结果与实测数据比较

	无偏移		误差/%	法向偏移 3 mm		误差/%
	仿真	实测		仿真	实测	
增益/dB	52.84	52.23	1.17	52.21	52.00	0.40
3 dB 波束宽度/(°)	0.390	0.380	2.63	0.48	0.49	2.04
左第一副瓣电平/dB	-14.33	-14.54	1.44	-17.30	-17.80	2.80
右第一副瓣电平/dB	-14.33	-14.18	1.06	-13.80	-12.50	9.40

如图 4 所示为不同面板偏移量所导致的 4 种类型的口面相位误差,图 5 所示为相对应的功率方向图. 可以看到,对于 4 种类型的口面相位误差,对应的功率方向图中主波束基本上都没有明显的变化,而旁瓣有不同量值的提高,特别是远旁瓣处,误差对其影响较大.

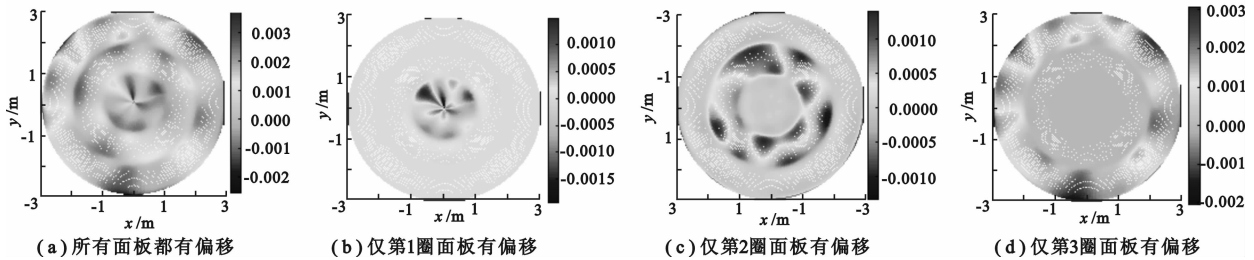


图 4 面板位置误差所导致的口面相位误差云图

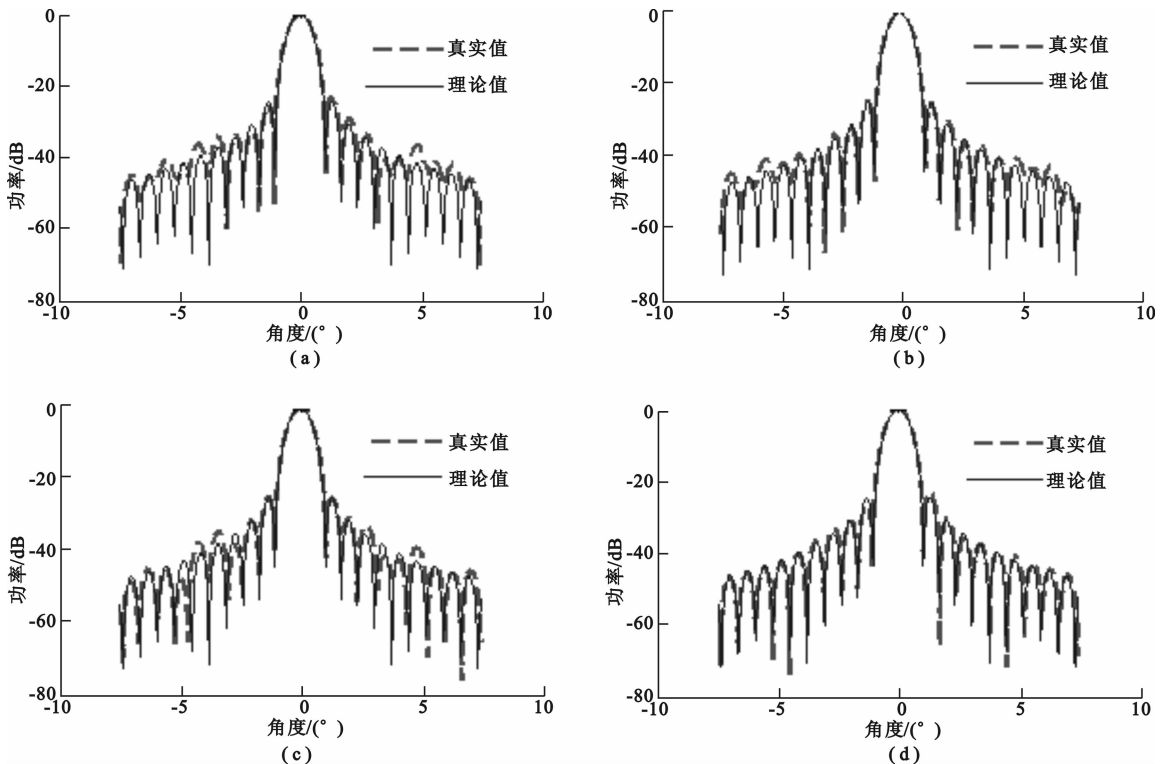


图 5 4 种不同面板位置误差所对应的天线功率方向图

另外,面板位置误差在反射面上的分布区域不同,所对应的旁瓣电平提高量值也有所不同.如图 5 所示,对于相同量级的面板位置误差,分布在反射面的中部(第 2 圈面板)所导致的旁瓣电平提升比分布在边缘的误差(第 1 圈和第 3 圈)要大.而总体来说,最外圈的面板位置误差对方向图的影响最小.

为了反映面板位置误差与口面相位误差的关系,取出第 3 圈的某块面板单独考虑.面板 3 个支撑点上的偏移向量为(10 mm, 10 mm, -10 mm),面板上采样点偏移误差及其所对应的口面相位误差如图 6 所示.从

图6中可以看出,面板上采样点偏移误差在天线的工作波长内连续变化为图6(a),而对应的口面相位误差则反映为锯齿状的变化为图6(b).

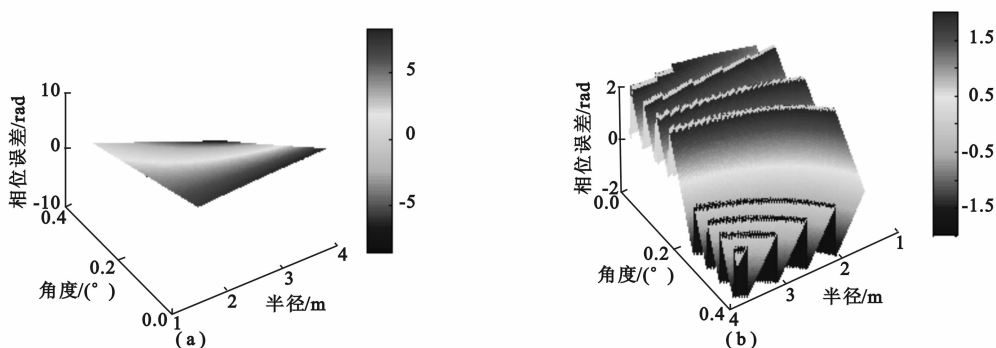


图6 波长为 20 mm 和 $(20/3)$ mm 时面板偏移量所对应的口面相位误差

分析图6(b)所示呈现锯齿状的变化情况,可以知道不管天线工作在那个频率,其口面相位误差必定在 $(-\pi, \pi)$ 区间内变化. 因此,为了提高分块反射面天线的电性能,类似于锯齿状的口面相位误差在面板安装调试时应予以避免.

4 结束语

根据分块反射面天线的结构特点,推导出了面板位置误差与口面相位误差的转换矩阵. 基于此误差转换矩阵,分析了面板位置误差对分块反射面天线电性能的影响机理. 选择具有3圈分块面板的反射面天线作为案例进行了仿真实验. 案例给出了面板位置误差对天线口面相位误差和功率方向图的影响,并对计算结果与实测数据进行了比较讨论. 结果分析显示模型相对误差小于10%,给出的误差转换矩阵可用于实际天线工程中对反射面天线电性能的估计以及面板调整.

参考文献:

- [1] Imbriale W A. Large Antennas of the Deep Space Network[M]. California: John Wiley & Sons Inc, 2003.
- [2] 叶尚辉. 天线结构设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [3] 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.
- [4] 雷娟, 万继响, 傅德民, 等. 一种多波束抛物面天线的设计与分析[J]. 西安电子科技大学学报, 2003, 30(3): 399-402
Lei Juan, Wan Jixiang, Fu Demin, et al. Design and Analysis of a Multi-beam Parabolic Reflector Antenna[J]. Journal of Xidian University, 2003, 30(3): 399-402.
- [5] Zarghamee M S, Antebi J, Kan F W. Optimal Surface Adjustment of HAYSTACK Antenna[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1995, 43(1): 80-86.
- [6] Kim J W, Kim B S. Computation of the Average Power Pattern of a Reflector Antenna with Random Surface Errors and Misalignment Errors[J]. IEEE Trans on Antenna and Propagation, 1996, 44(7): 996-999.
- [7] 王从思, 段宝岩, 仇原鹰. 大型天线变形反射面的新拟合方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2005, 32(6): 839-843.
Wang Congsi, Duan Baoyan, Qiu Yuanying. A Novel Method of Fitting the Distorted Reflector of a Large Antenna[J]. Journal of Xidian University, 2005, 32(6): 839-843.
- [8] Ruze J. The Effect of Aperture Errors on the Antenna Radiation Pattern[J]. Suppl al Nuovo Cimento, 1952, 9(3): 364-380.
- [9] Rahmat-Samii Y. An Efficient Computational Method for Characterizing the Effects of Random Surface Errors on the Average Power Pattern of Reflectors[J]. IEEE Trans on Antenna and Propagation, 1983, 31(1): 92-98.
- [10] 刘少东, 焦永昌, 张福顺. 表面误差对侧馈偏置卡塞格伦天线辐射场的影响[J]. 西安电子科技大学学报, 2005, 32(6): 865-868.
Liu Shaodong, Jiao Yongchang, Zhang fushun. Effect of Random Surface Errors on Radiation Characteristics of the Sided Offset Cassegrain Antenna[J]. Journal of Xidian University, 2005, 32(6): 865-868.