

表面误差对反射面天线电性能的影响

宋立伟, 段宝岩, 郑 飞, 马洪波

(西安电子科技大学机电科技研究所, 陕西西安 710071)

摘 要: 针对反射面天线存在的误差问题, 建立了包含系统误差和随机误差对电性能影响的数学模型. 该模型根据表面误差与口径面相位分布的关系, 利用口径法得到功率方向图. 通过对模型分析可知, 随机误差对方向图各个方位产生影响; 系统误差产生栅瓣, 且栅瓣的位置和电平取决于变形情况. 最后将模型应用到 8 米口径的抛物面天线中, 收到了满意的结果, 验证了文中模型和方法的正确性.

关键词: 反射面天线; 表面误差; 系统误差; 随机误差; 电性能

中图分类号: TN823.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 03-0552-05

The Effect of Surface Error on Reflector Antenna Performance

SONG Li-wei, DUAN Bao-yan, ZHENG Fei, MA Hong-bo

(Research Institute on Mechatronics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: To study the effect of the surface errors on reflector antenna performance, a computational model including systematic distortions and random errors was presented. In the model, power pattern was given by the aperture field method according to the relation between surface errors and the phase distribution of aperture plane. Then power patterns were simulated and it is shown that random errors work in every azimuth angles and systematic distortions generate grating lobes in a few angles, the location and level of grating lobes depend on the systematic distortions. Finally, the model was applied to a practical antenna with the diameter of 8 meters, the results show that the proposed model is valid.

Key words: reflector antenna; surface errors; systematic distortions; random errors; performance

1 引言

随着科学技术的发展, 反射面天线应用到了地面通信天线、星载可展开天线、射电天文望远镜等诸多方面, 同时也对反射面天线电性能指标提出了更高的要求, 例如高增益、窄波束、高效率等, 这必然提高反射面天线的电磁设计和结构设计的难度. 反射面天线通常工作在较高的频段, 为了追求更高电性能指标, 对天线结构的精度提出了更高的要求. 因此, 需要定量描述天线结构的各种误差信息对电性能的影响情况. 其中, 误差信息主要包括安装、制造误差和系统误差, 并且主要是反射面板的误差信息. 安装、制造误差属于随机误差, 是一种快速变化的误差, 这类误差对电性能的影响可通过概率方法进行估计. Ruze^[1]最早给出了随机误差与增益损失之间的关系, Vu^[2]将其公式进行了扩展, 对不均匀的随机误差与口径场的关系进行了研究. Rahmat-samii^[3]为了进行结构的参数化的研究, 给出了随机误差对平均功率方向图影响的数学模型. Ruze、Vu、Rahmat-samii 等人只

对反射面随机误差(面板制造精度)对电性能的影响关系进行了研究, 并没有考虑系统误差影响. 而系统误差是天线结构所固有的, 其来源是自重、温度、惯性、振动等载荷作用在天线结构上所引起的. 这类误差是缓慢变化的, 可通过结构分析确定结构变形信息. Bahadori K^[4]给出了系统误差对电性能影响的关系模型, 分析系统误差对增益和副瓣电平的影响. 然而 Bahadori K 没有给出反射面随机误差的影响以及反射面的背架支撑情况. 但在天线的实际工况中, 天线的各种误差信息(系统误差和随机误差)是同时存在的. 分析各种误差信息对电性能的综合影响情况, 是符合实际情况的. 对于反射面板而言, 随机误差取决于面板的制造精度, 不会随着工作状态和环境而改变; 系统误差则受天线工作状态、环境及其背架支撑结构的影响.

基于此, 建立了反射面在随机误差和系统误差同时存在时对电性能影响的数学模型. 利用结构分析给出反射面的系统误差信息, 通过数值方法分析计算了两种误差对反射面天线增益和副瓣电平的影响.

2 反射面的表面误差

这里以前馈式反射面天线为例, 图 1 是半径为 a , 焦距为 f 的抛物反射面天线的几何形式. 由于反射面位于馈源的远区, 则由馈源发出的电磁波, 经反射面到达口径面. 通常表面误差也不会很大, 可认为表面误差对口径面电磁场幅度的影响可以忽略, 只会引起口径面上电磁场的相位误差. 表面误差的表示形式有轴向误差、径向误差和法向误差, 这里采用轴向误差表示表面误差信息. 其中图 1 中虚线为反射面变形后的位置, 依据图中的几何关系, 光程差^[5]为:

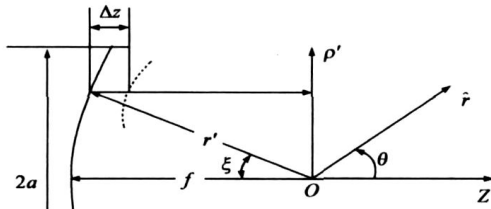


图1 抛物反射面天线的几何形式

$$\Delta \delta = \Delta z (1 + \cos \xi) = 2 \Delta z \cos^2(\xi/2) \quad (1)$$

由此可得到口径面的相位误差为:

$$\Delta \varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta z \cos^2(\xi/2) \quad (2)$$

其中: λ 为工作波长, Δz 为表面误差. 由于反射面表面误差包含随机误差和系统误差信息, 即:

$$\Delta z = \Delta z_r + \Delta z_s \quad (3)$$

其中: Δz_r 为随机误差, Δz_s 为系统误差. 则式(2)可改写为:

$$\Delta \varphi = \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta z_r + \Delta z_s) \cos^2(\xi/2) = \Delta \varphi_r + \Delta \varphi_s \quad (4)$$

其中: $\Delta \varphi_r = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta z_r \cos^2(\xi/2)$, $\Delta \varphi_s = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta z_s \cos^2(\xi/2)$. 随机误差可通过面板的制造精度来确定, 通常由制造公差来表示, 需通过概率方法处理. 系统误差则需对天线结构进行有限元分析, 来确定其变形信息 Δz_s .

设反射面天线的理想设计形状为 $z_0 = f_0(\rho', \phi')$, 在各种载荷作用下, 反射面的实际形状为:

$$z(\rho', \phi') = z_0 + \Delta z_s = f_0(\rho', \phi') + \Delta z_s(\rho', \phi') \quad (5)$$

根据结构刚度方程:

$$[K]\{\delta\} = \{p\} \quad (6)$$

其中: $[K]$ 为结构刚度矩阵, $\{\delta\}$ 为节点位移向量, $\{p\}$ 为载荷向量.

求解方程(6), 可得天线结构反射面的节点位移 $\{\delta\} = \{\Delta \rho'_i, \Delta \phi'_i, \Delta z'_i\}$. 由节点位移, 可确定变形后的反射面节点坐标信息为:

$$\{\rho'_i, \phi'_i, z_{0i}\} + \{\delta_i\} = \{\rho'_i + \Delta \rho'_i, \phi'_i + \Delta \phi'_i, z_{0i} + \Delta z'_i\} \quad (7)$$

通过插值或者拟合的方法, 可给出变形后反射面的形状 $z(\rho', \phi')$. 利用式(5), 则可以确定变形后反射面的轴向误差 $\Delta z_s(\rho', \phi')$.

这里给出了随机误差和系统误差同时存在时, 表面误差与口径面相位误差的函数关系, 并就系统误差进行了数学推导. 将此相位误差信息引入到电磁场的分析模型中, 便可得到表面误差对反射面天线电性能影响的数学模型.

3 平均功率方向图

根据口径场法, 变形反射面天线的远场方向图函数为^[6]:

$$E(\theta, \phi) = \iint_A E_0(\rho', \phi') e^{j\Delta\varphi} e^{jk\rho' \sin\theta \cos(\phi - \phi')} \rho' d\rho' d\phi' \quad (8)$$

其中: $\Delta\varphi$ 为口径面 A 上的相位误差, $E_0(\rho', \phi')$ 为口径面 A 上的场分布函数.

由于随机误差需要通过概率的方法进行处理, 因此, 对口径面进行网格划分, 采用图 2 所示沿径向划分为 N 个环, 每一环又划分为 K_n 个网格. 假定每一个网格内随机的相位误差 $\Delta\varphi$ 是相同的, 且等于该网格区域内中心点处相位误差.

则式(8)可改写为:

$$\begin{aligned} E(\theta, \phi) &= \iint_A E_0(\rho', \phi') e^{j\Delta\varphi} e^{jk\rho' \sin\theta \cos(\phi - \phi')} e^{j\Delta\varphi} \rho' d\rho' d\phi' \\ &= \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{K_n} E_{n,i} e^{j\Delta\varphi_{n,i}} \end{aligned} \quad (9)$$

$$E_{n,i} = \iint_{A_{n,i}} E_0(\rho', \phi') e^{j\Delta\varphi} e^{jk\rho' \sin\theta \cos(\phi - \phi')} \rho' d\rho' d\phi' \quad (10)$$

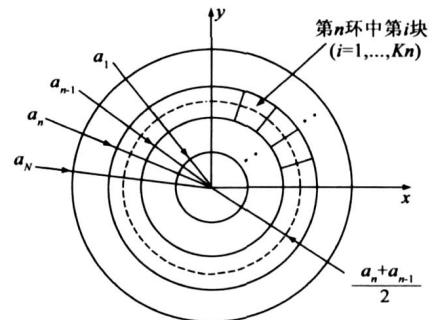


图2 口径面A的网格划分

根据式(9)和(10), 天线的辐射功率方向图为:

$$EE^* = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{K_n} \sum_{m=1}^{K_n} \sum_{l=1}^{K_n} E_{n,i} E_{m,l}^* e^{j(\Delta\varphi_{n,i} - \Delta\varphi_{m,l})} \quad (11)$$

则平均辐射功率方向图为:

$$\overline{EE^*} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{K_n} \sum_{m=1}^{K_n} \sum_{l=1}^{K_n} E_{n,i} E_{m,l}^* e^{j(\Delta\varphi_{n,i} - \Delta\varphi_{m,l})} \quad (12)$$

设网格间的随机相位误差信息是相互独立的, 且每一环上的随机误差满足均值为 0 标准差为 ε_n 的

正态分布, 可得到:

$$\overline{e^{j(\Delta\varphi_{r(n,i)} - \Delta\varphi_{r(m,i)})}} = \begin{cases} e^{-0.5(\varepsilon_n^2 + \varepsilon_m^2)} & n \neq m \\ 1 & n = m \end{cases} \quad (13)$$

面板制造误差的均方根与标准差之间的关系为:

$$\varepsilon_n = 4\pi\lambda(\varepsilon_{rms})_n \cos^2(\xi/2) \quad (14)$$

其中: $(\varepsilon_{rms})_n$ 是第 n 环的表面制造误差.

将式(13)代入式(12), 得到:

$$\overline{EE^*} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N E_{n,n-1} E_{m,m-1}^* e^{-0.5(\varepsilon_n^2 + \varepsilon_m^2)} + \sum_{n=1}^N E_{n,n-1} E_{n,n-1}^* (1 - e^{-\varepsilon_n^2}) \quad (15)$$

$$E_{n,n-1} = \int_{\alpha_{n-1}}^{\alpha_n} \int_0^{2\pi} E_0(\rho, \phi) e^{j\Delta\varphi} e^{j\rho \sin\theta \cos(\phi - \phi')} \rho d\rho d\phi \quad (16)$$

式(15)和(16)给出了表面误差含有系统和随机误差情况下, 对天线平均辐射功率方向图影响的数学模型. 通过对模型的模拟分析可得到表面误差对增益和副瓣电平的影响关系. 模型中, 当 $\Delta\varphi_s = 0$ 时, 即不存在系统误差时, 则为随机误差对天线电性能的影响; 当 $\Delta\varphi_r = 0$ 时, 即不存在随机误差时, 则为系统误差对天线电性能的影响; 当模型中 $\Delta\varphi_s = 0, \varepsilon_n = \varepsilon_m = \varepsilon$ 时, 式(15)和(16)可改写为:

$$\overline{EE^*} = e^{-\varepsilon^2} G_0 + (1 - e^{-\varepsilon^2}) \sum_{n=1}^N E_{n,n-1} E_{n,n-1}^* \quad (17)$$

$$G_0 = \left| \iint E_0(\rho, \phi) e^{j\rho \sin\theta \cos(\phi - \phi')} \rho d\rho d\phi \right|^2 \quad (18)$$

其中: G_0 为无误差时的辐射功率方向图. 等式右边第一项是工程中评估增益损失的常用公式, 为 Ruze 公式的修正形式^[3].

4 数值模拟

案例 1: 反射面天线的结构和电磁参数: 抛物反射面天线, 口面直径 $D = 2a = 240\lambda$, 焦距 $f = 168\lambda$, 口径面边缘锥削为 $ET = -10\text{dB}$, 假定口径面的幅度分布为 $E(\rho) = B + C(1 - \rho^2/a^2)^p, p = 2$.

通过表面误差对反射面天线电性能影响的数学模型, 分析了随机误差和系统误差单独存在时, 对电性能的影响情况. 图 3 给出了随机误差下的功率方向图. 模型中取 $N = 120$, 即随机误差的相关半径为 λ , 此时相关半径对增益损失没有影响^[6]. 图中各方向图对不存在表面误差(理想反射面)时的方向性系数进行了归一化处理.

从图中可看出, 随着制造公差即反射面均方根值的增加, 副瓣电平抬高, 并离主瓣越远的副瓣电平抬高越大. 同时主瓣的增益损失也增加, 因此需控制面板的

制造精度, 保证对增益和副瓣电平的影响不会超出设计指标要求.

通过对天线结构进行有限元分析, 确定反射面在外部载荷作用下的变形信息, 得到反射面天线的系统误差. 为了对得到的数学模型进行研究, 假定表面的系统误差为轴向周期函数 $\Delta z_s = \varepsilon_s \sin(2\pi n \rho / a)$, 图 4 和图 5 给出了天线在系统误差下不同周期和振幅情况的辐射功率方向图.

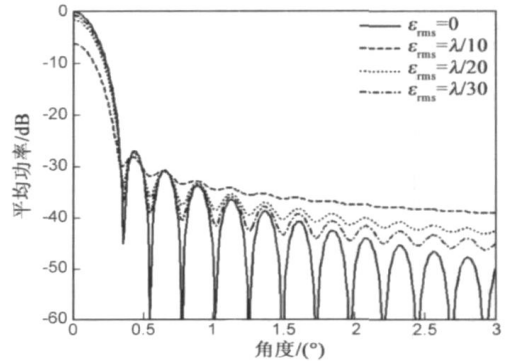


图3 不同制造公差对应的功率方向图

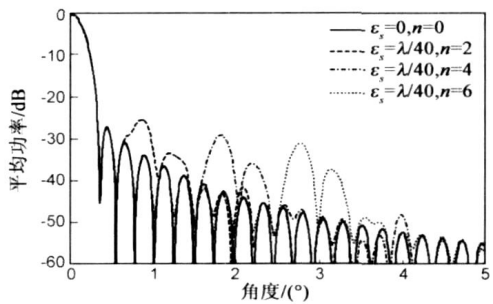


图4 不同周期对应的辐射功率方向图

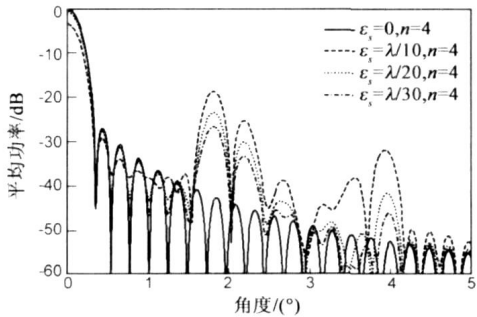


图5 不同振幅对应的辐射功率方向图

图 4 可看出, 系统误差是周期变形函数时, 会引起功率方向图产生栅瓣. 随着变形函数的频率增加, 栅瓣将向远副瓣方向移动, 并且影响方式是相同的. 还可看出, 对于同一振幅的情况下, 虽然不同周期变形函数时栅瓣的位置不同, 栅瓣电平抬高的值不同, 但栅瓣电平值是接近的. 可认为, 栅瓣电平主要取决于周期变形函数的振幅值. 图 5 可看出, 随着变形函数振幅值的增加, 栅瓣电平的位置并不改变, 但是其栅瓣电平值将提高. 同时增益损失值也将随着振幅的增加而增大. 实际情

况中, 表面的系统误差应该是几种误差周期函数的叠加, 这里用某一周期情况对其进行分析研究是可行的. 因此, 系统误差与随机误差分别对功率方向图的影响方式不同, 随机误差对各方位的功率都将产生影响, 而系统误差主要是在某些方位处产生影响.

例如: 定义表面系统误差为轴向非周期函数 $\Delta z_s = \xi \sin(2\pi n \rho / a((\rho/a)^x + \mu))$, 图 6 给出了天线在非周期的系统误差下辐射功率方向图. 图中可看出, 非周期函数的误差对副瓣的影响范围要比周期函数时的影响要多, 体现在副瓣的抬高数量增多. 这是非周期函数为不同周期函数叠加所造成的.

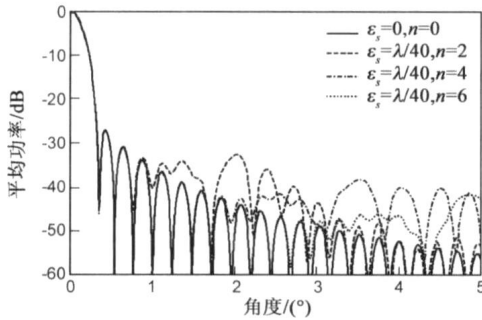


图6 $\chi=1, \mu=2.13$ 时对应的辐射功率方向图

接下来, 将系统误差和随机误差同时引入到模型中, 对其进行了数值分析, 给出了图 7 所示的其对功率方向图的综合影响关系曲线. 随机误差的均方根和系统误差的变形周期函数的振幅都为: $\lambda/40$, 其中取 $N=120, n=4$. 图 8 为随机误差的均方根为 $\lambda/40$, 系统误差的变形周期函数的振幅为 $\lambda/20$ 时的情况.

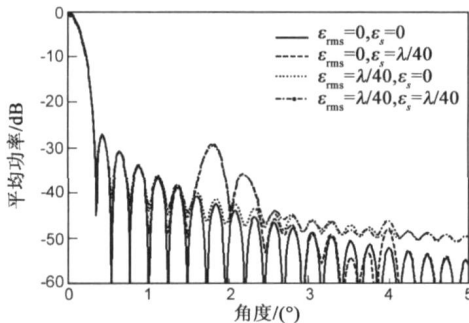


图7 随机误差和系统误差对功率方向图的综合影响

由图 7 可见, 随机误差的均方根和系统误差的振幅值相等时, 系统误差在某一方位处对副瓣电平影响远高于随机误差的影响. 则在图 8 中系统误差大于随机误差时, 在某一方位处随机误差的影响可被忽略. 为更清楚地了解随机误差和系统误差对天线增益影响, 表 1 给出了天线增益损失值与随机误差和系统误差之间的关系. 其中, 增益损失值为实际反射面天线的增益与理想反射面天线的增益之间的差值. 由表 1 中可见, 两类误差的综合影响在增益损失上基本满足叠加原理. 在副瓣区域, 两类误差的综合影响是误差单独存在作用时

影响的结合, 在系统误差影响的位置, 随机误差的影响很小, 其它位置又和随机误差单独影响时很接近.

表 1 随机误差和系统误差下的增益损失分析

情况	误差信息		增益损失 (dB)	结果分析
	ϵ_{rms}/λ	ϵ_s/λ		
1	1/40	0	0.3859	叠加: 0.3859+ 0.1954= 0.5813 差值: 0.5813- 0.5811= 0.002
2	0	1/40	0.1954	
3	1/40	1/40	0.5811	
4	1/40	0	0.3859	叠加: 0.3859+ 0.7951= 1.1810 差值 1.1810- 1.1800= 0.0010
5	0	1/20	0.7951	
6	1/40	1/20	1.1800	

案例 2: 某工程案例, 8m 口径的圆抛物面天线, 焦距为 3m. 天线反射面是实板型, 背架属桁架类, 工作频率为 15GHz, 背架为钢结构, 有 336 根杆单元, 96 个节点, 材料的弹性模量为 $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, 密度为 $7.85 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$, 面板为铝合金, 厚度为 4mm, 密度为 $2.73 \times 10^3 \text{ kg/cm}^3$, 面板的制造公差为 0.5mm, 杆件的截面分为 12 类, 具体结构参数可在文献[7]中找到.

天线结构在指平姿态下, 受自重和正吹的风载荷影响下对其进行了力学分析, 图 9 给出了天线背架结构变形前与变形后的示意图, 其中虚线为变形前的结构, 实线为变形后的结构.

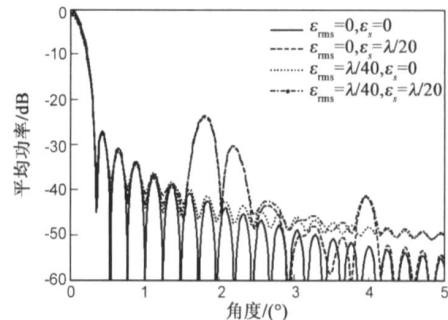


图8 随机误差和系统误差对功率方向图的综合影响

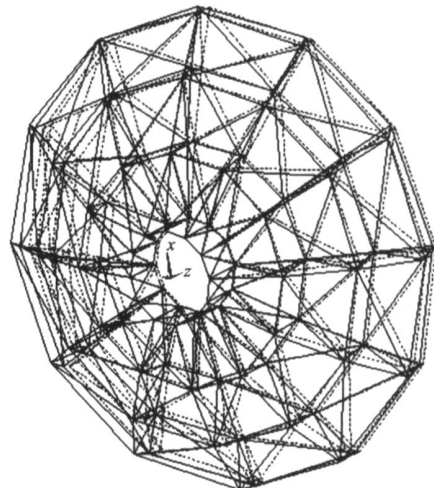


图9 天线背架结构变形前与变形后的示意图

图 10 给出 8m 天线的表面误差对功率方向图的影响

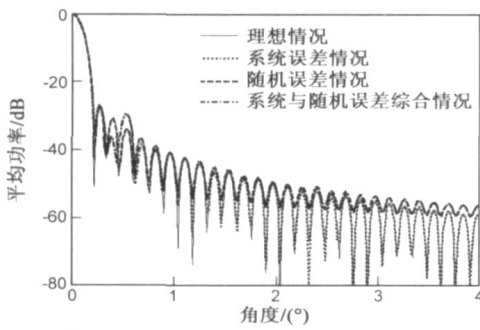


图10 表面误差对功率方向图的影响

响. 图中可看出, 系统误差和随机误差对功率方向图的影响方式与案例1的分析结果一样的. 但在这里, 系统误差主要是抬高了第二、第三副瓣. 这表明实际工况下天线的变形情况是有规律的, 可用周期函数来对其进行逼近.

因此, 在实际工作中, 应尽量先保证天线结构不发生形变, 同时提高反射面板的制造精度, 则可提高天线的电性能. 对增益要求高的天线, 面板的制造精度应提高的一些; 对副瓣要求高的天线, 天线结构的刚度需提高, 尽量降低结构形变的量级.

5 小结

本文在前人研究的基础上, 建立了包含系统误差和随机误差情况下对电性能影响的数学模型. 对模型数值分析可看出, 随机误差和系统误差对功率方向图的影响方式是不同的. 需针对电性能指标的要求, 对天线的面板制造精度和结构刚度进行合理的分配. 文中的分析结果可为反射面天线的设计提供参考.

参考文献:

- [1] Ruze J. Antenna tolerance theory - A review [J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(4): 633- 640.
- [2] Vu T B. The effect of aperture errors on the antenna radiation pattern [J]. Proceedings of the IEE, 1969, 116: 195- 202.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] 朱钟淦, 叶尚辉. 天线结构设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979. 202- 206.
ZHU Zhonggan, YE Shanghui. The Design of Antenna Structure [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979. 202- 206. (in Chinese)
- [6] Sinton S, Rahmat samii Y. Random surface error effects on offset cylindrical reflector antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(6): 1331- 1337.
- [7] 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. 121- 124.
DUAN baoyan. The Analysis, Optimization and Measurement of Antenna Structure [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1998. 121- 124. (in Chinese)

作者简介:

宋立伟 男, 1982 年出生于内蒙古, 现为西安电子科技大学机电工程学院博士研究生, 主要研究方向为电子装备机电耦合理论及应用.

E-mail: slw1206@163.com

段宝岩 男, 1955 年出生于河北省, 现为西安电子科技大学机电工程学院教授、博士生导师. 主要研究方向为电子装备机电耦合理论及应用、天线结构与伺服系统、工程结构优化设计等.

E-mail: byduan@xidian.edu.cn

郑飞 男, 1967 年出生于湖南省, 现为西安电子科技大学机电工程学院教授、硕士生导师. 主要研究方向为电子装备机电耦合理论及应用、基于三维造型的建模与仿真、星载展开结构等.

E-mail: fzhenf@mail.xidian.edu.cn

马洪波 男, 1975 年出生于山东省, 现为西安电子科技大学机电工程学院副教授、硕士生导师. 主要研究方向为电子装备机电耦合理论及应用、结构可靠性工程、优化设计等.

E-mail: mhbm@mail.xidian.edu.cn