

文章编号: 1001-893X(2011)09-0106-06

遗传算法在星载数传天线优化设计中的应用^{*}

张新刚, 吴 刚, 钟 鹰

(中国空间技术研究院 西安分院, 西安 710100)

摘 要:为使星载赋形反射面数传天线的增益满足指标要求,采用改进的实数编码遗传算法对其进行了优化设计。首先基于几何光学原理得到反射面中截线的初始形状,然后采用 Newton 插值函数对中截线进行拟合并把插值函数的系数作为优化变量,最终利用改进的遗传算法对优化变量进行调整来获得理想的赋形波束。为证明此方法的有效性,对一个 X 频段赋形反射面天线进行了优化设计,并与基于几何光学原理综合算法所得结果进行了对比。数值仿真结果表明:该方法不仅能够保证覆盖角域内任意一点的增益均高于设计指标要求,而且使天线在最大覆盖角度处的增益达到了 7 dBi,提高了天线系统的性能。

关键词:遥感卫星;数据传输;反射面天线;遗传算法;赋形波束;优化设计

中图分类号: TN823.27; TN820.88 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.09.022

Application of Genetic Algorithm in Design of Data Transmission Antennas on Satellite

ZHANG Xin-gang, WU Gang, ZHONG Ying

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710100, China)

Abstract: To make the gain meet the design requirements, the application of the improved real coded genetic algorithm(GA) in the design of a data transmission antenna on satellite is presented. Firstly, the initial shape of the middle transversal line is obtained based on the Geometry optics theory, and then the Newton interpolation function is used to fit it, finally the ideal contoured beam is obtained by adjusting the coefficients of the function through the improved GA. To verify the validity of this method, the optimization results of a shaped reflector at X band are presented and compared with the results by Geometry optics method. The numerical simulation results show that this method can not only ensure the gain in the coverage area higher than the design demands, but also make the gain in the maximum coverage angle reach 7 dBi, thus improving the performance of the antenna.

Key words: remote sensing satellite; data transmission; reflector antenna; genetic algorithm; contoured beam; optimization design

1 引 言

600~1 000 km 轨道高度是多种遥感卫星通用的轨道,为了使地面覆盖区域内接收信号电平不随卫星位置变动,数传天线的辐射方向图应能弥补星地间传输途径的空衰变化,这种波束称为地球匹配

波束。20 世纪 80 年代,我国开始研制传输型遥感卫星,数传天线也同时起步。最初为了减缓卫星总装布局的困难,采用结构紧凑的背射双线螺旋天线^[1]或波导十字缝阵组合天线来实现波束赋形。虽然也达到了当时国际上赋形反射面天线类同的性能与功能,但是功率耐受和最大指向圆锥面辐射对称

^{*} 收稿日期:2011-03-11;修回日期:2011-06-10

性问题限制了这两种天线的应用。

为了满足航天任务的需要,十分有必要研制性能更为优良的赋形反射面数传天线。但是,目前国内赋形反射面数传天线的性能较之国外有不小的差距,因为设计过程中,国外通常基于物理光学原理,通过对天线远场站点的性能进行评估,不断调整反射面形状从而保证天线波束满足设计要求。而国内大都基于几何光学原理,利用馈源入射能量和反射面反射能量相等来确定中截线的形状。

在基于几何光学原理来进行优化设计时,没有考虑馈源的遮挡对天线性能的影响,而实际工程中所用的同轴多模馈源的口径相对较大,必然会影响到天线的辐射性能。因此,基于几何光学原理优化所得到的天线波束与预期的设计目标会存在偏差,不能保证覆盖角域内的增益都满足设计要求。为了降低馈源遮挡对天线性能的影响,有学者采用带反射板的交叉阵子馈源来代替同轴多模馈源^[2]。虽然交叉阵子馈源的遮挡较小,但是此种馈源的辐射性却不理想,会影响天线的整体性能。

因此,要获得理想的地球匹配波束,在设计过程中要考虑馈源遮挡对天线性能的影响,而且为了保证覆盖角域内任意一点的性能都满足设计要求,必须在覆盖角域内设置很多的观测站点,优化设计过程中需要对这些站点的性能进行评估,所以此类天线设计问题属于多目标优化问题。

遗传算法是一种全局性搜索算法,非常适合于求解多目标优化问题,已被广泛应用于阵列天线的设计^[3-5],并获得了十分良好的设计结果。但是,此算法在赋形反射面天线优化设计中的应用研究目前还处于起步阶段。文献[6]采用实数编码遗传算法对反射面天线形状进行了优化设计,产生了一个覆盖巴西领土的赋形波束。但是在构建适应度函数时,仅仅考虑了天线增益的平均值,而实际应用中在服务区不同的位置对天线增益要求是不同的,把平均值作为适应度函数是不恰当的。

为设计出高性能的赋形反射面数传天线,本文采用改进的实数编码遗传算法在几何光学算法优化结果的基础上,对第一种端值条件下的中截线形状进一步进行了优化设计。优化过程中,利用物理光学法来计算观测站点的性能,并参照目标向量法来设置适应度函数,从而保证覆盖角域内任意一点的性能都满足设计要求。

2 基于几何光学的综合算法

理想归一化功率方向图数学表达式为

$$G(\theta) = 20 \lg [R(\theta)/h] + G_0 \tag{1}$$

在覆盖区内:

$$0^\circ \leq \theta \leq \theta_m$$

$$R(\theta) = \sqrt{r^2 + (r + h)^2 - 2r(r + h)\cos\beta} \tag{2}$$

$$\frac{\sin\beta}{R(\theta)} = \frac{\cos\varepsilon}{r + h} \tag{3}$$

式中, θ_m 为最大覆盖角, h 为卫星轨道高度, r 是地球平均半径, ε 是地面站天线的接收仰角, β 为地面站与星下点的地心角, G_0 为星下点的增益要求,单位为 dBi。

以往进行赋形反射面数传天线设计时,通常是基于几何光学原理进行的。在设计时首先确定其端值条件,然后利用馈源入射能量和反射面反射能量相等来确定中截线。最初进行设计时通常采用第一种端值条件(图 1(a)),但是在此种端值条件下馈源将会遮挡反射面的部分辐射,会在天线远场的近轴角域形成电平凹区。为了消除馈源的遮挡,文献[2]首次提出了第二种端值条件(图 1(b))。此种端值条件下,基本上消除了馈源的遮挡,但是在近轴中心区会形成起伏很大的干涉波纹。这些干涉波纹不仅使得近轴区域某些小角域的电平低于设计要求的最低电平线,而且对地面接收设备的性能提出了更高的要求。

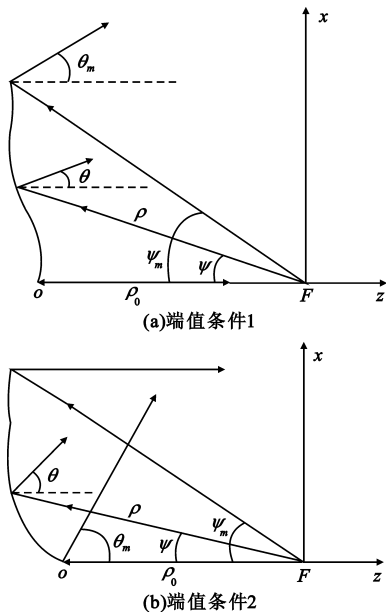


图 1 赋形反射面中截线示意图
Fig.1 Middle transversal line of the shaped reflector

为了方便对比,首先以一个工作中心频率为 8.25 GHz 的 X 频段赋形反射面数传天线为例,基于几何光学方法对第一种端值条件下天线中截线进行优化设计,得到天线中截线如图 2 所示。

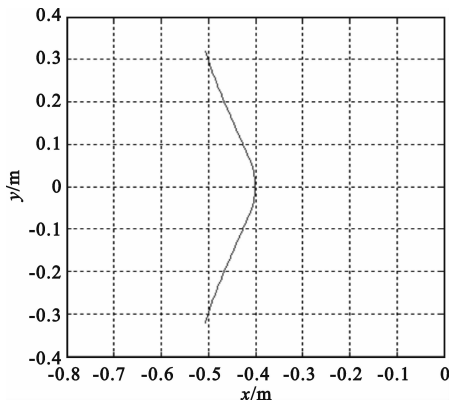


图 2 基于几何光学原理的中截线曲线
Fig.2 Middle transverse line based on Geometry Optics

反射面的半径 a 为 0.325 m, ρ_0 为 0.4 m, h 为 600 km,地面站起始工作仰角 $\epsilon_{\min}$ 为 5° ,对应的最大覆盖角 θ_m 约为 65.57° ,最大覆盖角处的增益 G_m 为 7 dBi。为获得理想圆对称的天线远场方向图,在本文仿真设计中设定馈源的方向图为 $(\cos\theta)^q$, $q = 10$ 。

3 天线远场分析方法及结果

根据几何光学方法确定赋形反射面天线中截线后,一般采用物理光学法(PO)^[7-8]计算其远区辐射场,根据 PO 可得反射面的远区场表达式为

$$\mathbf{E}_{po} = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi r} e^{-jkr} \int_{s'} [\mathbf{r}_0 \times (\mathbf{J}_e \times \mathbf{r}_0)] e^{-jkr' \cdot \mathbf{r}_0} ds' \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_e = 2(\mathbf{n} \times \mathbf{H}_i) \quad (5)$$

式中, $\mathbf{H}_i$ 是馈源在反射面上的入射磁场, $\mathbf{J}_e$ 是反射面表面的感生电流, $\mathbf{n}$ 是反射面上法线的单位矢量, μ_0 是自由空间的磁导率, ω 是角频率, k 是波数, $k = 2\pi/\lambda$, r 是观察点所在的位置矢量, $r = |\mathbf{r}|$, $\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}/r$, $\mathbf{r}'$ 是场源所在的位置矢量, s' 代表反射面表面。

馈源位于数传天线中心位置,采用 PO 法计算其远场时,要把馈源的遮挡效应考虑进去。通常采用的近似处理方法是,假设馈源遮挡辐射口径部分等于它的物理面积^[9],并且由于天线的工作角域较大,要把反射面边缘的绕射作用考虑进去。通常采用物理绕射理论^[10-12]对 PO 方法的计算结果进行修正,以提高计算精度。

$$\mathbf{E}_{PTD} = jk \int_C Z_0 I_s \times (\mathbf{s} \times \mathbf{t}) + M_s \times \mathbf{t} \frac{\exp(-jkR)}{4\pi R} d\mathbf{l} \quad (6)$$

式中, I_s 和 M_s 分别是反射面边缘等效电流和磁流, $\mathbf{s}$ 是散射波单位矢量, $\mathbf{t}$ 是反射面边缘切向单位矢量, $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$, Z_0 是自由空间特征阻抗, C 是反射面边缘的闭合曲线。

利用式(4)~(6)计算如图 2 所示的中截线确定的反射面天线的远场,得到的结果如图 3 所示。

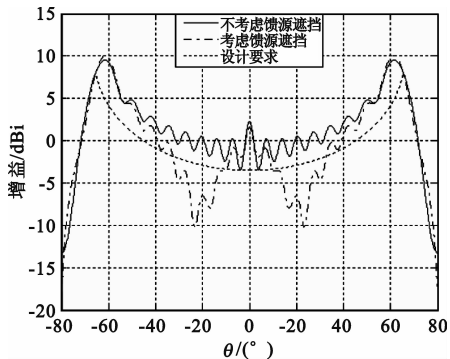


图 3 天线远场方向图
Fig.3 Patterns of the reflector antenna

图 3 中实线是不考虑馈源遮挡的天线方向图,点划线为考虑馈源遮挡的天线方向图,虚线为设计要求。从图中可以看出,不考虑馈源的遮挡时,天线性能完全满足设计指标要求。但是馈源位于反射面的正前方,不可避免地会遮挡反射面口径的部分辐射。考虑馈源的遮挡效应后,远场某些区域的增益就低于设计指标要求。以往通常采用交叉振子馈源来代替同轴多模馈源来减少遮挡效应,但是馈源的一次辐射特性会变差。

可见,基于几何光学的综合算法不能保证在所有的覆盖角域内设计增益满足指标要求,为了克服这一缺陷,必须对中截线的形状重新进行优化。本文采用基于实数编码的改进遗传算法来进行改进。之所以选择基于几何光学原理得到的中截线形状为优化初始值进行优化,是为了使得提高初始种群的适应度值,加快算法的收敛速度。

4 改进实数编码遗传算法及优化结果

要对中截线的形状进行优化,首先利用 z 和 x 的之间关系来表示图 2 中的中截线,因为中截线是旋转对称的,所以只取 $x \geq 0$ 的部分来进行拟合。本文采用 N 次的 Newton 插值多项式来进行拟合中

截线形状,具体表达式如下式所示:

$$z=f(x)=a_0+a_1(x-x_1)+a_2(x-x_1)(x-x_2)+\cdots+a_N(x-x_1)(x-x_2)\cdots(x-x_N)\quad (7)$$

把所有展开系数合成起来构成优化变量 $\boldsymbol{X}=(a_0,a_1,a_2,\cdots,a_N)^T$, 这样通过调节 $\boldsymbol{X}$ 就可以改变中截线的形状。下面详细阐述本文方法的实现过程。

4.1 算法实现

步骤 1:编码

实数编码直接使用问题变量进行编码,避免二进制编码方法对解的精度的限制,提高了遗传算法的精度;并且避免二进制的编码和解码过程,减少运算的复杂度,提高了运算效率,因此本文采用实数编码的方式来描述个体。

步骤 2:构造适应度函数

在 $0\sim\theta_m$ 范围内等间隔选择 M 个角度作为评估站点,则对于给定的染色体 X ,按照式(4)~(6)来计算每个评估站点的电场值 $f_{co}(\theta)$,并与设计指标 $G(\theta)$ 进行对比。参考目标向量优化法^[13]可构造出如下式所示的适应度函数:

$$F(X)=\sum_{i=1}^M P_i\quad (8)$$

$$P_i=\begin{cases} 1, & f_{co}(\theta_i)\geqslant G(\theta_i) \\ -2, & f_{co}(\theta_i)<G(\theta_i) \end{cases}\quad (9)$$

采用这种方式来创建适应度函数既可以避免其中某些评估站点的信息明显优于其它站点,又可以突出那些增益低于设计指标的站点,使优化朝着提高这些站点增益的方向进行,加快算法的收敛速度。

步骤 3:选择

本文采用传统的轮盘赌方式来选择进行繁殖的父代。

步骤 4:交叉

在由父代个体产生新一代个体时,为了保证子代中染色体的多样性,避免算法陷入局部最优,采用 3 种方法来完成交叉操作^[3]。具体实现过程如下:

(1) 25% 的子代染色体采用差分方式产生,其交叉公式如下:

$$X_i^{t+1}=X_{r_1}^t+K(X_{r_2}^t-X_{r_3}^t)\quad (10)$$

式中, r_1,r_2,r_3 为采用轮盘随机选择 3 个父代个体的编号, K 是在 $[-1,1]$ 之间的实数, t 是进化代数。

(2) 50% 的子代个体采用内插和外推法产生。首先随机选择两个父代个体,然后分别采用内插和外推法来产生新的个体,具体过程如下式所示:

$$\begin{aligned} Y_1^{t+1} &= C\times X_{r_1}^t+(1-C)X_{r_2}^t \\ Y_2^{t+1} &= C\times X_{r_2}^t+(1-C)X_{r_1}^t \\ Y_3^{t+1} &= X_{r_1}^t+C(X_{r_1}^t-X_{r_2}^t) \\ Y_4^{t+1} &= X_{r_2}^t+C(X_{r_2}^t-X_{r_1}^t) \end{aligned}\quad (11)$$

式中, C 是集合 $[0,0.5]$ 的一个随机数。

(3) 剩余的 25% 子代个体通过单点基因交换来产生,得到的新个体直接进入下一代群体。

步骤 5:变异

变异操作前,先将交叉后的种群中适应度最大的个体直接复制进入下一代。随着进化代数的增加,种群之间的个体差异变小,交叉难以产生新的个体,所以采用自适应变异概率^[4],变异概率随进化代数增大而增大。

$$P_m(t)=P_m(t-1)+(P_{m,\max}-P_m(0))/G\quad (12)$$

式中, $P_{m,\max}$ 是允许的最大变异概率,一般取 0.1%~1%, t 是进化代数, G 是进化的总代数。

每个个体随机产生一个 $[0,1]$ 之间的数,小于变异概率的个体允许变异,对于满足变异条件的个体,随机叠加一个变异量,产生一个新的个体。

$$X_i^{t+1}=X_i^t+\delta_i\quad (13)$$

在进化后期,出现新个体间隔越来越长,当连续若干代未产生新的最优个体时,则认为可能陷入局部最优,随机选择个体进行强制变异。

步骤 6:最佳保留策略

为了加快算法的收敛速度,在进化过程中把每代中适应度最差的个体剔除出去。具体做法是利用上一代中适应度最高的个体来代替本代中适应度最差的个体。

4.2 算法优化结果

本文在对图 2 所示的中截线曲线进行拟合时,采用 5 次的 Newton 插值函数,所取的 6 个插值节点 $x_1\sim x_6$ 的值(单位: cm)分别为 0.0、4.64、9.84、15.9、23.4、32.5,则优化前后插值函数的系数如表 1 所示。

表 1 插值节点及优化前后的系数值
Table 1 Interpolation points and the coefficients before and after optimization

优化前后	插值函数系数					
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
优化前	-0.400	-0.151	-2.04	9.86	-27.5	53.2
优化后	-0.216	-0.078 2	-2.35	11.1	-25.1	42.0

把插值函数所有的系数构成优化变量 X ,采用

改进的实数编码遗传算法对其进行优化。初始种群的大小为 160,进化代数为 500,交叉概率为 0.75,变异概率的最小值为 0.001,最大值为 0.01,优化后天线远场等值线图 and 插值函数的系数分别如图 4 和表 1 所示。

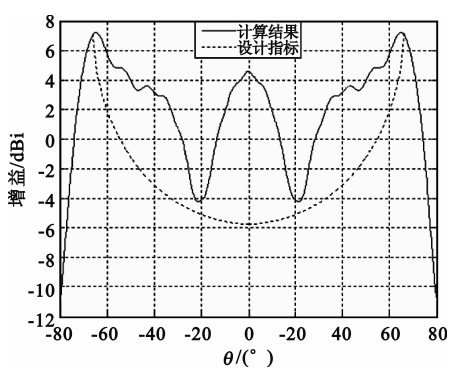


图 4 优化后天线远场方向图

Fig.4 Patterns of the antenna after optimization

图 4 是对端值条件 1 的优化结果,与图 3 进行对比可以看出,优化后在天线的近轴区域没有形成电平凹区,覆盖角域内任何一点的增益均满足设计指标要求,而且在最大覆盖角处的天线增益达到了 7 dBi。在文献[2]中,为了消除馈源的遮挡,采用交叉阵子加反射板来代替同轴多模馈源后,同样尺寸的天线在最大覆盖角处的增益只有 6.5 ± 0.5 dBi。可见,本文采用遗传算法对天线形状进行优化设计后,不仅消除了由于馈源的遮挡在近轴区域所形成的电平凹区,而且提高了天线的性能。

5 结 论

本文以星载赋形反射面数传天线为研究对象,建立了利用改进实数编码遗传算法对其进行优化设计的数学模型,并对一个 X 频段数传天线进行了仿真计算。本文在群体选择的基础上多种方法相结合的方式产生新个体,并采用自适应变异概率来保证新一代染色体模式的多样性;为加快算法的收敛速度,利用参考目标向量优化法来构造适应度函数并引入了最佳保留策略。仿真数据结果验证了该方法的有效性,对工程应用具有重要的参考价值。

参考文献:

[1] 叶云裳,李全明. 资源一号卫星 X 波段 IR - M SS 数传天线[J]. 宇航学报,2001,22(6):1 - 9.
YE Yun - shang, LI Quan - ming. X - band IR - M SS data

transmission antenna used on CBERs - 1 satellite[J]. Journal of Astronautics, 2001,22(6):1 - 9. (in Chinese)

[2] 张正光,叶云裳. 对地观察卫星赋形反射面数传天线设计[J]. 中国空间科学技术,2004,24(1):7 - 11.
ZHANG Zheng - guang, YE Yun - shang. Shaped - beam reflector design for data transmission of earth resource satellite [J]. Chinese Space Science and Technology,2004,24(1):7 - 11. (in Chinese)

[3] 何学辉,朱凯然,吴顺君. 基于实数编码遗传算法的稀疏阵列综合[J]. 电子与信息学报,2010,32(9):2277 - 2281.
HE Xue - hui, ZHU Kai - ran, WU Shun - jun. Thinned array synthesis based on integer coded genetic algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32 (9):2277 - 2281. (in Chinese)

[4] 张霞,陶海红,廖桂生. 基于实数编码遗传算法的方向图模值综合方法[J]. 系统工程与电子技术,2008,30 (6):1022 - 1026.
ZHANG Xia, TAO Hai - hong, LIAO Gui - sheng. Pattern synthesis with desired magnitude response based on real coded genetic algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008,30(6):1022 - 1026. (in Chinese)

[5] 张玉洁,龚书喜,王文涛,等. 非规则曲面共形阵列的优化设计[J]. 电子与信息学报,2010,32(9):2226 - 2230.
ZHANG Yu - jie, GONG Shu - xi, WANG Wen - tao, et al. Optimization design of conformal array on irregular curved surface[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(9):2226 - 2230. (in Chinese)

[6] Avila S L, Carpes W P, Vasconcelos J A. Optimization of an offset Reflector Antenna Using Genetic Algorithms[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 1256 - 1259.

[7] 李鹏,张志华,王为,等. 基于不同网格形式的反射面天线方向图分析[J]. 系统工程与电子技术,2009,31 (2):347 - 351.
LI Peng, ZHANG Zhi - hua, WANG Wei, et al. Far field pattern numerical analysis of reflector antenna based on different grid forms [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(2):347 - 351. (in Chinese)

[8] 王伟,段宝岩,马伯渊. 重力作用下天线反射面形变及其调整角度的确定[J]. 电波科学学报,2008,23(4): 645 - 650.
WANG Wei, DUAN Bao - yan, MA Bo - yuan. Gravity deformation and best rigging angle for surface adjustment of large reflector antennas [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(4):645 - 650. (in Chinese)

[9] 魏文元,宫德明,陈必森. 天线原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1995:279 - 280.
WEI Wen - yuan, GONG De - ming, CHEN Bi - sen. Aetenna theory [M]. Xi' an: Xidian University Press, 1995: 279 - 280. (in Chinese)

[10] Johansen P M. Uniform physical theory of diffraction equiva-

lent edge currents for truncated wedge strips [J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 1996, 44(7): 989-995.

[11] 冯林,邓书辉,阮颖铮. 反射面天线带内雷达散射截面[J]. 电波科学学报,1996,11(2):18-21.
FENG Lin, DENG Shu-hui, RUAN Ying-zheng. Reflector antenna's RCS in operating band[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1996,11(2):18-21. (in Chinese)

[12] 肖疆,徐晓文,董涛. 多孔毁伤时赋形反射面天线辐射特性的研究[J]. 电波科学学报,2003,18(6):648-651.
XIAO Jiang, XU Xiao-wen, DONG Tao. Study on the radiation characteristics of a shaped beam reflector antenna under the multi-hole damnification[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(6):648-651. (in Chinese)

[13] Carlos A C. An empirical study of evolutionary techniques for multi-objective optimization in engineering design[D]. New Orleans:Tulane University, 1996.

作者简介:

张新刚(1980—),男,河北人,博士研究生,主要研究方向为赋形反射面天线、反射阵天线等;
ZHANG Xin-gang was born in Hebei Province, in 1980. He is currently working toward the Ph.D. degree. His research interests include shaped reflector antenna, reflectarray antenna, etc.
Email: xinkou224@126.com

吴刚(1981—),男,陕西人,博士研究生,主要从事卫星有效载荷技术研究工作;
WU Gang was born in Shaanxi Province, in 1981. He is currently working toward the Ph.D. degree. His research concerns the payload of satellite.

钟鹰(1944—),男,浙江人,研究员、博士生导师,主要从事星载天线的分析和设计等方面的研究工作。
ZHONG Ying was born in Zhejiang Province, in 1944. He is now a senior engineer of professor and also the Ph.D. supervisor. His research concerns the analysis and design of satellite-borne antennas.

《电讯技术》征稿启事

《电讯技术》(月刊)创刊于 1958 年,由中国西南电子技术研究所主办,系国内外公开发行的、理论与应用相结合的综合性电子专业科技刊物,为中文核心期刊。目前,已被英国 IEE《科学文摘(SA)》INSPEC、美国《剑桥科学文摘(CSA)》、波兰《哥白尼索引(IC)》等国外知名数据和国内多个中文数据库收录。

本刊主要刊登涉及下列应用方向和技术领域的述评、论文、新概念新技术新产品介绍:

• 电子系统工程

• 通信

• 导航

• 识别

• 飞行器测控

• 卫星应用

• 雷达

• 信息战

• 共性技术(包括天线、射频电路、信号处理、信息处理、监视与控制、时间与频率、先进制造、电磁兼容等)。

本刊栏目有:系统总体技术、信号与信息处理技术、计算机、网络及其应用技术、信道技术、先进制造技术、基础技术、述评与展望。

欢迎业内学者、专家及科技人员踊跃投稿。

来稿要求及注意事项:

(1)文稿务必主题明确,论述合理,逻辑严谨,数据可靠,叙述清楚,文字精炼。内容应保守国家机密,并提供所在单位的保密审查证明,引用他人作品应给出来源。

(2)文稿一般不应超过 6 000 字,综述稿不超过 8 000 字。稿件应附英文题名、作者名、单位名、摘要和关键词,基金项目应注明项目编号。中文题名一般不超过 20 个汉字,必要时可加副标题。

(3)摘要应包括目的、方法、结果和结论四要素,即用简洁的语言说明文章要解决的问题,主要工作过程及所采用的技术手段和方法,研究所获得的实验数据、结果及其意义。篇幅以 200~300 字为宜。

(4)关键词以 3~8 个为宜。为便于文献检索,应尽可能根据《中国图书馆分类法(第四版)》提供中图分类号。

(5)文中涉及的物理量和计量单位应符合国家有关标准。计量单位请用 GB3100-3102-93《量和单位》规定的法定计量单位。注意区分各物理量符号的文种、大、小写、正斜体(矢量和矩阵用黑斜体)、上、下角标等。

(6)插图和表格只给出必要的,且应有图题和表题。插图最好采用计算机制作。照片以黑白为佳,也可采用扫描的电子文档(精度高于 400 dpi, tif, jpg, psd 等格式均可)。

(7)文稿中引用他人的成果,务请写明原作者姓名、题名、来源,一并在参考文献中给出,并在正文中相应位置进行标示,否则责任由来稿人自负。参考文献只择主要的,未公开发表的文献请勿列入参考文献。书写格式请参见 GB/T 7714-2005 文后参考文献著录规则。

(8)投稿邮箱: dianxunjishu@china.com, 并尽量同时提供 Word 和 pdf 文档,无需另寄打印稿。来稿请注明作者详细通信地址、联系电话和有效电子邮箱,并注明拟投栏目。

(9)本刊编辑部将在 3 个月之内对来稿作出取舍,如逾期未收到处理意见或刊用通知,作者有权对稿件另行处理。稿件一经刊用,本刊将酌情从优支付稿酬并赠送当期样刊,本刊支付的稿酬中已包含作者著作权使用费。请勿一稿多投,否则后果自负。