

文章编号: 2095-4980(2016)05-0733-05

基于 UTD 和 GA 混合算法的无人机载天线布局优化

韩帅涛^{1,2}, 侯德亭¹, 邹伟¹, 杨佳萌¹

(1.信息工程大学 理学院, 河南 郑州 450001; 2.63880 部队, 河南 洛阳 471000)

摘要: 为克服无人机天线之间的相互干扰, 采用遗传算法对天线进行优化布局, 以减少天线间的耦合。通过采用一种新的目标函数, 结合一致性几何绕射理论对圆柱体上的单极子天线和无人机表面上单极子天线的布局进行优化, 得到了最佳的优化位置。通过 Feko 仿真对优化位置结果进行验证, 得到了最佳位置处 S 参数值, 可知天线优化位置后相互之间的耦合度变小, 这也间接证明了该方法计算的正确性。该方法能够及时准确地对机载天线间的耦合度进行预测和评估, 具有实际应用价值。

关键词: 遗传算法; 天线耦合; 布局优化; 一致性几何绕射理论

中图分类号: TN821[†].1

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201605.0733

Layout optimization of UVA airborne antennas based on GA and UTD

HAN Shuaitao^{1,2}, HOU Deting¹, ZOU Wei¹, YANG Jiameng¹

(1.College of Science, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450001, China; 2.Unit 63880, Luoyang Henan 471000, China)

Abstract: In order to overcome the interference of the antenna, the Genetic Algorithm(GA) is used to optimize the layout of the antenna to reduce the coupling between antennas. By using a new objective function, combining with the Uniform geometrical Theory of Diffraction(UTD), layout optimization is performed on the monopole antennas both on the cylinder and on the surface of Unmanned Aerial Vehicle(UAV). The results of location optimization are proved by Feko simulation, and the S parameter values at the best position show that the coupling between antennas becomes smaller after the placement optimization, which also indirectly validates the correctness of the method. This method can be applied to predict and evaluate the coupling degree of the airborne antenna on time and has practical application value.

Key words: Genetic Algorithm; antenna coupling; layout optimization; Uniform geometrical Theory of Diffraction

随着电子信息技术的发展, 无人机上采用的天线数量和种类越来越多, 其中有部分天线频率还相互重叠, 加上无人机空间有限, 从而导致天线系统相互之间的干扰十分严重。为解决这个问题, 应该在无人机的设计阶段, 对天线的位置进行布局优化^[1], 来减少天线之间的电磁耦合。本文主要研究的是圆柱上和无人机机体上单极子天线的位置布局。基于上述问题, 需首先确定采取哪一种电磁计算模型最有效。一般来说, 电磁问题的计算首先想到的都是矩量法, 它作为低频方法的代表, 是公认的高精确度数值计算方法。但对于如无人机等电大尺寸目标, 需占用较多的计算机内存, 尤其是当频率升高时, 它们对计算机资源的占用急剧增加。而一致性几何绕射理论(UTD)这样的高频近似方法相对来说要高效得多, 它们本身不需要存储任何大规模的矩阵, 正好可以解决如无人机等电大目标上天线的优化布局问题。另外, UTD 场的局部性原理对于形状较为复杂的物体可以看成是许多简单几何构形的复合体, 对每个复杂构形的各个局部分别引用已知的典型问题解, 然后把各个局部对总场的贡献叠加起来, 可求得复杂物体的场, 这项特性正好适用于无人机上天线场的研究。近年来, 天线耦合度计算结合遗传算法(GA)的研究有很多^[2-4], 但综合起来主要是利用远场增益公式或高频计算公式对平板上单极子天线进行优化布局, 而将 UTD 与 GA 结合起来对圆柱上单极子天线的布局进行优化的研究还较少, 本文基于此, 探究将两者结合起来进行优化的算法。

收稿日期: 2015-05-06; 修回日期: 2015-07-21

基金项目: 中国工程物理研究院复杂电磁环境实验室课题资助项目(2013ECF)

1 一致性几何绕射理论

凸曲面上电磁波的耦合遵循 Keller 的几何绕射理论(Geometrical Theory of Diffraction, GTD)^[5]公式, 但该理论对于亮区与阴影区交界的过渡区失效, 不能保证场的连续性。20 世纪 70 年代, Pathaka 和 Kouyoumjian 等^[6]克服了 GTD 的缺点, 得到了便于工程应用的一致性 GTD 解^[7], 较好地解决了电磁场在阴影边界上的连续性问题, 将之发展成为 UTD。UTD 可以用于预测任意光滑凸曲面上电磁波的耦合。

下面对任意光滑凸曲面上单极子天线电磁波的耦合^[5]进行介绍。在处理光滑凸曲面上单极子的辐射时, 可以定义一个无穷小电流矩 \mathbf{P}_e ^[6]:

$$d\mathbf{P}_e(Q') = I(l')d\mathbf{l}'n' \quad (1)$$

$$d\mathbf{P}_e(Q) = I(l)d\mathbf{l}n \quad (2)$$

见图 1, Q' 和 Q 点分别为发射天线和接收天线的位置, \mathbf{n}' 和 \mathbf{n} 分别为发射天线和接收天线处平面的法向量, \mathbf{t}' 和 \mathbf{t} 是 Q' 点指向 Q 点的方向, $\mathbf{t}' \times \mathbf{n}' = \mathbf{b}'$, $\mathbf{t} \times \mathbf{n} = \mathbf{b}$, $I(l')$ 和 $I(l)$ 分别是 Q' 和 Q 点单极子天线上的电流分布, $d\mathbf{l}'$ 和 $d\mathbf{l}$ 分别是 Q' 和 Q 点的单极子天线增量长度。

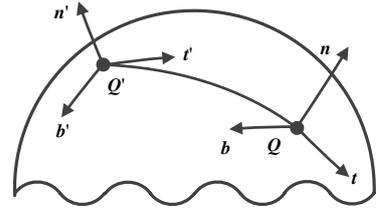


Fig.1 Position of monopole antenna on a convex surface
图 1 凸曲面上单极子天线的位置

对于任意光滑凸结构的耦合场 \mathbf{E} 一般形式为^[6]:

$$d\mathbf{E}(Q|Q') = -d\mathbf{P}_e(Q')\bar{T}(Q|Q')G_0(kt)D \quad (3)$$

式中: k 是波数; D 是一个常量; 格林函数 $G_0(kt) = e^{-jkt}/t$, t 是 Q' 与 Q 点的最短路径长度; \bar{T} 是绕射系数,

$$\bar{T} = 2Z_0\mathbf{n}'\mathbf{n} \left\{ \ddot{V}(\xi) - \frac{j}{kt}\dot{V}(\xi) + \left(\frac{j}{kt}\right)^2 [A_s\ddot{V}(\xi) + A_c\ddot{U}(\xi)] + T_0^2 \frac{j}{kt} [\ddot{U}(\xi) - \dot{V}(\xi)] \right\} \quad (4)$$

对于圆柱上的单极子天线, $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ 为常量, μ_0 为磁导率, ϵ_0 为介电常数, $D=1$, $A_s=0$, $A_c=1$, $T_0^2 = \cot^2 \alpha'$, $\ddot{U}(\xi)$ 和 $\dot{V}(\xi)$ 分别是软型和硬型福克函数, 有: $\xi = \frac{mt}{P_g}$, $m = \left(\frac{kP_g}{2}\right)^{1/3}$, $P_g = \frac{a}{\sin^2 \alpha'}$, a 是圆柱半径, α' 是 Q' 点 2 个主曲率半径之间的夹角, 见图 2, 为圆柱表面的展开面。

$$\ddot{U}(\xi) = \left[\frac{kt}{2m^2\xi} \right]^{2/3} U(\xi) \quad (5)$$

$$\dot{V}(\xi) = \left[\frac{kt}{2m^2\xi} \right]^{2/3} V(\xi) \quad (6)$$

$$U(\xi) = \frac{\xi^{3/2} e^{j3\pi/4}}{\sqrt{\pi}} \int_{e^{-j2\pi/3}}^{\infty} \frac{W_2'(\tau)}{W_2(\tau)} e^{-j\xi\tau} d\tau \quad (7)$$

$$V(\xi) = \frac{\xi^{1/2} e^{j\pi/4}}{\sqrt{\pi}} \int_{e^{-j2\pi/3}}^{\infty} \frac{W_2(\tau)}{W_2'(\tau)} e^{-j\xi\tau} d\tau \quad (8)$$

式中: W_2 是福克函数; 对 $U(\xi)$ 和 $V(\xi)$ 的求解参看文献[8]。

对于圆柱结构, 要计算 Q' 与 Q 点的最短路径长度 t , 须把圆柱体表面展开。根据微分几何, 圆柱面是典型的可展曲面, 简单来讲就是沿圆柱的母线切开, 曲线上的各点随之展开。在图 2 中, 对 Q' 和 Q 点用柱坐标来表示, 分别为 (a, θ', z') 和 (a, θ, z) , $\Delta\theta = \theta' - \theta$, $\Delta z = z' - z$ 。

图 3 为展开成平面后的图形, 根据三角形法则, 有 $t = \sqrt{(a\Delta\theta)^2 + (\Delta z)^2}$ 。

综合以上各式可知, 对于圆柱上单极子天线的电磁波耦合公式为:

$$d\mathbf{E}(Q|Q') = -\frac{jk}{4\pi} d\mathbf{P}_e(Q') 2Z_0\mathbf{n}'\mathbf{n} \left[\ddot{V}(\xi) - \frac{j}{kt}\dot{V}(\xi) + \left(\frac{j}{kt}\right)^2 (A_s\ddot{V}(\xi) + A_c\ddot{U}(\xi)) + T_0^2 \frac{j}{kt} (\ddot{U}(\xi) - \dot{V}(\xi)) \right] G_0(kt)D \quad (9)$$

到目前为止, 这些方程是描述圆柱上某一对单极子天线的电磁波耦合, 如果问题要求包含多个天线对, 则必须对每个单独天线对重复式(1)~式(9)的步骤, 接收天线的耦合场是所有电磁波耦合场的总和。

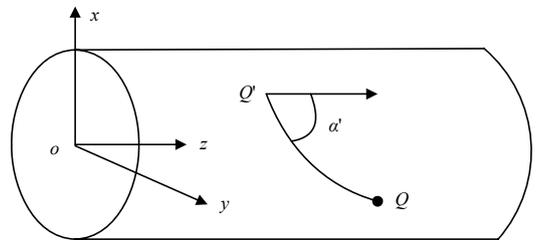


Fig.2 Position of monopole antenna on a cylindrical
图 2 圆柱体上单极子天线位置

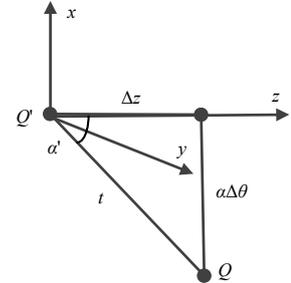


Fig.3 Graph of expansion of cylindrical surface
图 3 圆柱面展开后图形

2 天线耦合度的计算

天线的耦合度 C 定义为接收天线端口的输入功率与发射天线端口的输出功率之比的 10 倍对数值:

$$C = 10 \lg \frac{P_r}{P_t} \tag{10}$$

式中: P_r 是接收天线端口的输入功率; P_t 是发射天线端口的输出功率。除了简单的相互干扰外, 天线耦合还可以使天线的辐射方向图变形, 改变输入阻抗而导致天线效率降低或损害天线接收器。本文中, 采取 UTD 耦合电场的解决方案来确定 2 个天线间的耦合度, 而不用基于耦合电流分布和输入阻抗来计算天线之间的耦合度^[9]。

根据微波网络理论, 利用网络散射参数即 S 参数来确定天线的耦合度。将圆柱上的多对天线等效为 n 端口网络, 经过推导可知:

$$C = 20 \lg |S_{21}| \tag{11}$$

由 UTD 可计算出 n 端口网络的 Z 矩阵, 及其网络互易,

$$Z_{21} = Z_{12} = - \int_0^{l'} \int_0^l d\mathbf{E}(Q|Q') d\mathbf{P}_e(Q) / [I(l')_0 I(l)_0] \tag{12}$$

式中: $I(l')_0$ 和 $I(l)_0$ 分别表示 Q' 和 Q 点天线馈电点处的电流。 Z_{11} 和 Z_{22} 为单极子天线馈电点电压和馈电点电流的比值。然后根据 Z 矩阵到 S 矩阵的变换关系得到^[10]:

$$S_{21} = (2Z_{21}) / [\det(\mathbf{Z}) + Z_{11} + Z_{22} + 1] \tag{13}$$

根据式(11)即可求出天线间的耦合度。

3 目标函数的建立

通过以上的分析, 可知在给定单极子天线长度 l 、工作频率 f 、圆柱半径 a 和单极子天线电流分布 I 后, 即可利用 UTD 方法算出天线间的耦合度。其中未知参量是各个天线所在位置的柱坐标, 对于圆柱来说, 由于半径一定, 因此只需对多对单极子天线坐标点 (θ, z) 优化, 即遗传算法所处理的对象是待优化天线的位置坐标。本文通过编程, 对圆柱上单极子天线的耦合度建立 UTD 计算函数, 然后对 GA 进行编程, 并将 UTD 计算函数嵌套进去, 从而实现 GA 对天线的布局优化。在对多变量进行优化时, 通常可将多变量合并成一个目标函数。这个目标函数最终输出一个基于问题输入变量的值, 该值是唯一的衡量其优劣的尺度。天线布局的优化过程将通过遗传算法中的选择、交叉、变异来实现, 它们的对应关系是: 选择是将初始群体中目标函数值较小的天线布局方案保留下来; 交叉是在定义域内搜索天线的安装位置; 变异是保证天线布局方案的多样性, 在局部范围内搜索天线的安装位置, 最后经过多次进化得到最佳的天线优化布局。

用 x 表示圆柱上单极子天线的数目, 那么圆柱上单极子天线相互之间构成的天线对数目 X 为^[11]:

$$X = \frac{x!}{2(x-2)!} \tag{14}$$

目标向量 C 表示为:

$$\mathbf{C} = [c_1, c_2, \dots, c_x, c_{DX}, c'_1, \dots, c'_x] \tag{15}$$

目标向量 C 共包括元素的总数为 $X + x + 1$, 各个元素必须进行归一化处理, 这可减少 GA 过早收敛的可能性。式中: c_i 是第 i 个天线对的归一化耦合度; c_{DX} 值是所有归一化耦合度的数量方差, 它是为了实现一个优化平衡, 消除不对称的耦合度分布。要充分地预估计遮挡物对天线方向图性能的影响, 需考虑所关注平面的方向图的优劣程度。 c'_i 是第 i 个天线归一化方向图的优劣值。由于所采用的是单极子天线属于全向天线, 其方向图的优劣值可由失真度 σ 来表征, c'_i 是失真度 σ 的归一化值:

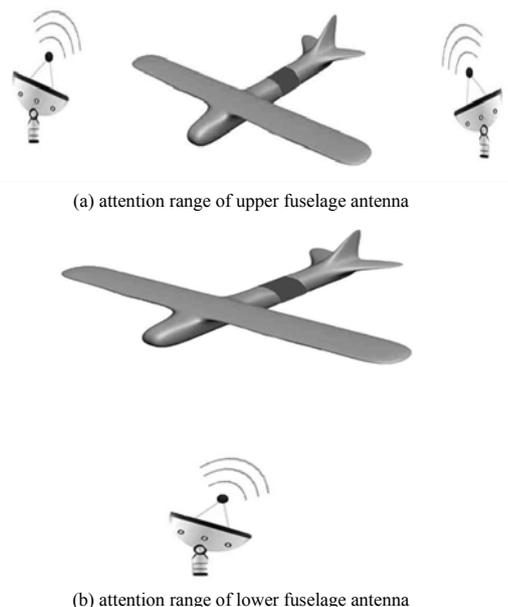


Fig.4 Upper and lower parts of the body are concerned with the range of the antenna

图 4 机身上部和下部天线被关注范围示意图^[13]

$$\sigma = \left| \frac{1}{M'-1} \sum_{\alpha=1}^{M'} (\mathbf{E}_{\alpha} - \mathbf{E}_{\beta})^2 \right|^{1/2} \quad (16)$$

$$\mathbf{E}_{\beta} = 1/M' \sum_{\alpha=1}^{M'} \mathbf{E}_{\alpha} \quad (17)$$

式中： M' 表示方向图上所取的计算点数； \mathbf{E}_{α} 为方向图上各计算点的值，表示某方位上的场强值； \mathbf{E}_{β} 表示方向图上各计算点的算术平均值，即场强平均值。需要说明的是，应用天线的互易性，接收天线的受遮挡程度可以用该天线作为发射天线时的方向图失真度来表示。

本文对机身上部天线和机身下部天线选定不同的关注平面，对关注平面的范围进行选点计算，被关注平面的范围规定见图4，机身上部天线关注平面为机身左右侧各 30° 的范围，这便于无人机贴地面飞行时与地面站进行通信；机身下部天线关注平面为机身下部 60° 的范围，这便于无人机在高空飞行时与地面站进行通信^[12]。

最小化的目标函数可写为：

$$\text{Fitness} = \lg \frac{\mathbf{C} \cdot \mathbf{W}^T}{X + x + 1} \quad (18)$$

式中 \mathbf{W}^T 是权重向量，它提供了一个通过强调目标向量中的相关元素来更好地满足设计要求的特性，在这种构造下，适应度函数能最快找到设计要求的最优解。

4 计算实例

考虑半径 $a=0.25$ m的圆柱上和无人机模型上3个可移动的天线(6个变量)的优化。对于无人机模型的计算仅限于图5中被黑色阴影标记的沿着无人机机身4.3 m~4.9 m范围内的区域，该范围近似于圆柱，与理想圆柱在计算时具有可比性。本文优化的是2个机身上部天线和1个机身下部天线，采用天线频率 $f=900$ MHz，单极子天线长度为 $l=\lambda/4$ 。此优化采取统一的权重因子，都取为1，即 \mathbf{W}^T 中元素都为1。

比较圆柱体模型和无人机模型上单极子天线随进化代数的收敛情况，使用相同的参数和相同的初始种群，从图6(a)和图6(b)中可以看出，在圆柱上单极子天线的布局优化在100代(“代”是遗传算法中进化的代数)处收敛到最优，无人机上天线的布局优化在130代处收敛到最优，可见无人机收敛速度要慢。表1中展示了圆柱上和无人机上单极子天线最初的安装位置(按照规定范围假设的安装位置)和优化布局后的安装位置，并给出了最优化布局后的最小目标函数值，可以看出两者比较接近且最终的 (θ, z) 值表现出基本平均分布的现象，这也符合实际设计经验。从图6和表1中也可以看出两者结果也是有差异的，这种差异经过分析认为是因为无人机天线辐射方向图多少会受到机翼等的影响。

通过Feko仿真计算最初位置和最后的优化位置的耦合作用对UTD结果进行验证，仿真结果见表2。通过对比，可知天线优化位置后相互之间的耦合度变小，这也间接证明了该方法计算的正确性。

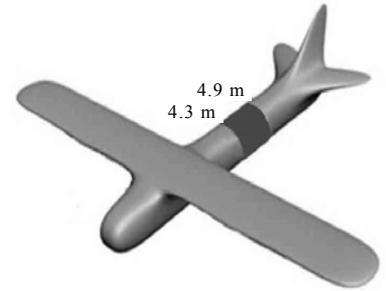
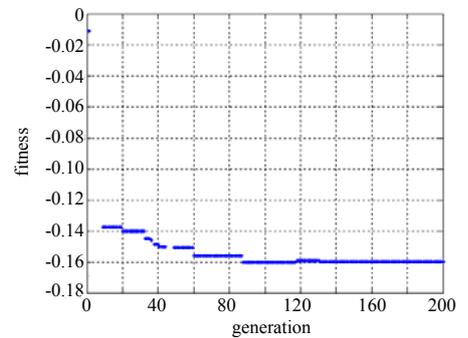
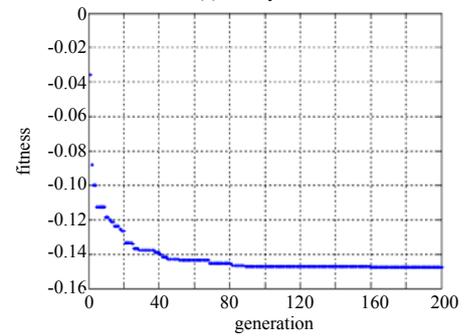


Fig.5 Actual UAV model
图5 实际无人机机体模型



(a) on a cylinder



(b) on a UAV

Fig.6 Minimum objective function value changing with the GA evolution algebra comparing with cylinder and UAV

图6 圆柱与无人机上单极子天线最小目标函数值随GA进化代数变化收敛情况的比较

表1 最终天线优化位置和对应的最小化目标函数值

radiator	initial position	cylinder	UAV model
1	(11.0°, 4.30 m)	(0.1°, 4.30 m)	(-5.3°, 4.30 m)
2	(-11.0°, 4.80 m)	(-0.1°, 4.90 m)	(10.5°, 4.90 m)
3	(180°, 4.60 m)	(173°, 4.65 m)	(-178°, 4.60 m)
associated fitness values	0	-0.156 2	-0.165 3

表2 初始位置和优化后位置对应的Feko仿真S参数值

radiator	S_{21} of Feko/dB	S_{31} of Feko/dB	S_{32} of Feko/dB
initial position of cylinder	-42.13	-65.86	-64.52
optimized position of cylinder	-45.97	-67.10	-66.25
initial position of UAV model	-44.36	-65.11	-63.98
optimized position of UAV model	-46.32	-68.55	-67.25

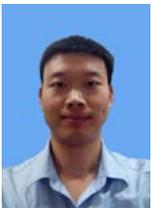
5 结论

本文依据 GA 和 UTD 描述了在无人机表面上任意数目天线最优布局位置的一种通用方法。若不是计算时间和计算机资源有限,此优化总目标函数可以包括任意数量可移动的和固定的天线间的耦合。通过对无人机载天线耦合度进行数值比较,并通过 Feko 对比验证,得到天线优化位置后相互之间的耦合度变小,从而也验证了该方法的正确性。该方法能够更及时准确地对机载天线间的耦合度进行预测和评估,对于工程设计上具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 刘莹,谢拥军,张勇. 车载集群通信系统"自顶向下"电磁兼容设计[J]. 电子科技大学学报, 2010,39(5):720-724. (LIU Ying,XIE Yongjun,ZHANG Yong. "Top-Down" design flow and its applications in multi-vehicle communication system's EMC design[J]. Journal of UESTC, 2010,39(5):720-724.)
- [2] 王小军. 基于遗传算法的机载天线布局优化[D]. 南京:南京理工大学, 2012. (WANG Xiaojun. The airborne antenna layout optimization based on GA[D]. Nanjing,China:Nanjing University of Science and Technology, 2012.)
- [3] 王显文. 机车顶部多天线布局带来的互耦效应研究[D]. 北京:北京交通大学, 2010. (WANG Xianwen. The research on effect of mutual coupling caused by locomotive antennas layout[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2010.)
- [4] 刘子梁,张玉,梁昌洪. 用 MoM-UTD 混合方法分析机载平台天线间的隔离度[J]. 电子与信息学报, 2006,28(1):2167-2170. (LIU Ziliang,ZHANG Yu,LIANG Changhong. Isolation between antennas on airborne platform using MOM-UTD hybrid method[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006,28(1):2167-2170.)
- [5] KELLER J B. Geometrical theory of diffraction[J]. Journal of the Optical Society of America, 1962,52(2):116-130.
- [6] PATHAK P,WANG N. Ray analysis of mutual coupling between antennas on a convex surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1981,29(6):911-922.
- [7] PATHAK P H. An asymptotic analysis of the scattering of plane waves by a smooth convex cylinder[J]. Radio Science, 1979, 14(3):419-435.
- [8] LEE S W,SAFAVI-NAINI S. Approximate asymptotic solution of surface field due to a magnetic dipole on a cylinder[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1978,26(4):593-598.
- [9] PATHAK P,KOUYOUMJIAN R. A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface[J]. Proceedings of the IEEE, 1974,62(11):1448-1461.
- [10] 梁昌洪. 计算微波[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1985. (LIANG Changhong. The Calculation of Microwave[M]. Xi'an,China:Xi'an Electronic and Science University Press, 1985.)
- [11] KOPER E M,WOO W D,SCHNEIDER S W. Aircraft antenna coupling minimization using genetic algorithms and approximations[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004,40(2):742-751.
- [12] 张宇,陶晓明. 卫星地面站天线跟踪性能评估方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(4):508-511. (ZHANG Yu, TAO Xiaoming. Evaluation method for tracking performance of satellite earth station antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(4):508-511.)

作者简介:



韩帅涛(1988-),男,河南省汝州市人,在读硕士研究生,目前主要从事电磁兼容技术和高功率微波技术等研究,已发表中文核心期刊论文 2 篇.email:1031365154@qq.com.

侯德亭(1963-),男,河南省洛阳市人,硕士,教授,主要研究领域为高功率微波发射与传输技术、电磁效应等,支持、参加国家高技术研究发展计划(863 计划)等项目,发表论文 36 篇,其中 EI 收录 15 篇,获发明专利 4 项.

邹伟(1982-),男,江苏省南通市人,在读硕士研究生,主要从事电磁场与微波技术研究.

杨佳萌(1991-),男,黑龙江省鸡西市人,在读硕士研究生,主要从事数学应用统计研究.