

增加主瓣增益控制的阵列天线方向图综合遗传算法

左智超, 王明杰, 郭肃丽

(中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081)

摘要: 阵列天线方向图综合是针对阵列天线方向图进行的相关研究中的一项基础性的研究内容; 不同的应用场景中不仅需要设计形式不同的天线阵列, 更需要阵列天线方向图并根据不同的性能参数指标要求进行分析优化, 从而获得符合使用要求的阵列方向图; 针对传统阵列天线方向图综合算法在方向图综合过程中未考虑主瓣增益约束的问题, 提出了一种用于阵列天线方向图综合的改进遗传算法; 在经典遗传算法的基础上设计了新的适应度函数以满足特殊情况下对主瓣增益进行约束的需求; 并在算法计算过程中增加了精英保留策略, 设计了随进化代数改变的交叉、变异概率; 经仿真实验, 结果表明所提算法能够在阵列天线方向图综合时在保证主瓣方向上的增益满足要求的同时可以获得相对低的副瓣电平水平。

关键词: 阵列方向图综合; 遗传算法; 主瓣增益控制

Genetic Algorithm of Array Antenna Synthesis with Main Lobe Control

Zuo Zhichao, Wang Mingjie, Guo Suli

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Array antenna Synthesis is a basic research content of array antenna pattern. In different application scenarios, it is not only necessary to design antenna arrays in different forms, but also to combine array orientations and conduct analysis and optimization according to the requirements of different performance parameters, so as to obtain array orientations that meet the use requirements. In order to solve the problem that the traditional algorithm did not consider the main lobe gain constraint in pattern synthesis, an improved genetic algorithm for array pattern synthesis was proposed. A new fitness function is designed to meet the special requirement of the main lobe. At the same time, elite retention strategy is added in the method and dynamic crossover mutation probability is designed to improve the optimization effect of genetic algorithm. Simulation results show that the proposed algorithm can obtain a lower side lobe level with the main lobe gain guaranteed.

Keywords: array pattern synthesis; genetic algorithm; main lobe control

0 引言

阵列天线方向图综合是阵列天线设计中的一个重要分支, 是指根据一定的方向图设计需求, 通过各种优化算法计算各阵元激励幅度、相位以及空间分布以得到满足要求的天线方向图^[1]。阵列天线方向图综合算法性能的优劣决定了天线的性能, 是阵列天线中的重点和难点之一。其中, 副瓣电平已经成为了阵列天线方向图综合问题中的一项重要性能指标^[2]。为了满足低副瓣电平要求, 通常会引起天线主瓣展宽、主瓣增益下降等不利影响^[3]。切比雪夫综合方法是一种获得一组天线阵列幅度加权值的算法, 算法不添加外界干扰条件, 在仅考虑系统白噪声的情况下进行计算获得相应的波束方向图。切比雪夫波束形成算法可以获得等副瓣的波束方向图, 且在达到给定的目标副瓣电平的同时可以获得最窄的主瓣宽度, 同样若给定主瓣宽度则获得此时可以到达的最低的副瓣电平^[4]。最小均方误差综合方法本质上是基于维纳滤波理论构成一种空域滤波器, 从而达到增强期望信号, 抑制干扰和噪声信号的目的。采用该方法需要知晓干扰信号方向先验信息, 并且当信噪比较小虽然可以在干扰方向

形成零点, 但是在主瓣附近不能形成期望中的副瓣形状, 也不能对主瓣增益进行约束。

现有阵列天线方向图综合算法主要是针对方向图副瓣增益进行抑制或在特定方向形成零陷从而达到抑制干扰的目的, 选择性的忽略了对于主瓣方向上的增益进行控制, 因此在实现低副瓣或特定零陷的同时主瓣方向上的最大增益值相比于等幅激励阵列会大幅度降低, 即天线效率大幅降低。然而, 主瓣方向上的增益会对天线作用距离产生直接影响。因此, 在一些对于增益要求较高且无法通过其他手段提高主瓣方向增益的应用场景中, 应尽量减少主瓣方向上的增益损失, 在满足需要增益电平的前提下进行阵列天线方向图综合。针对以上问题, 本文提出了一种改进的阵列天线方向图综合遗传算法。该算法通过改进适应度函数对主瓣方向上的增益进行约束, 避免综合过程中主瓣方向上增益的过度损失, 并在遗传算法中增加了精英保留策略, 改进了交叉、变异概率的设定, 从而使所得到的阵列天线方向图既满足了主瓣方向上的电平增益要求, 同时又达到了一定的低副瓣水平。

1 线性相控阵方向图

以侧射线性相控阵列天线为例, 设线性天线阵列由 $2N+1$ 个天线阵元组成, 辐射波束与天线在同一 xoy 平面内。图 1 是由 $2N+1$ 个阵元组成的线性阵列天线简图, 天线阵

收稿日期: 2019-10-28; 修回日期: 2019-11-21。

作者简介: 左智超(1993-), 男, 河北石家庄人, 硕士, 主要从事相控阵技术方向的研究。

元之间的间距为 d ，远场阵列天线方向图的观测角度为 θ ($\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$)，天线波束指向为 θ_b ，第 n 个天线阵元的激励电流为 I_n 。

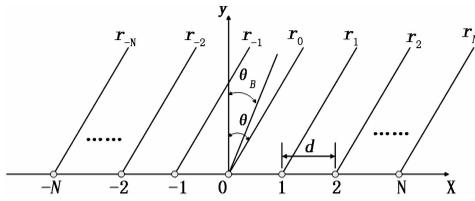


图 1 $2N+1$ 阵元线阵简图

假定天线阵元方向图 $f_n(\theta)$ 是全向性的，即可在阵线天线波束扫描范围内忽略其影响，此时侧射线性阵列天线方向图函数可表示为^[5]

$$F(\theta) = \sum_{n=-N}^N I_n e^{ikx_n \sin\theta} \quad (1)$$

式中， $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数， λ 为工作波长； x_n 为第 n 个天线阵元的物理位置。

令远场观测角度 $\theta = 0^\circ$ ，则式 (1) 可简化为：

$$F(0) = \sum_{n=-N}^N I_n \quad (2)$$

此时可以发现 $F(0)$ 仅由 I_n 确定，对 I_n 进行控制即可改变此方向上的阵列方向图，即改变此方向上阵列天线的辐射强度。同理，当阵列单元位置 x_n 固定不变时，远场方向 θ 上的方向图函数 $F(\theta)$ 仅由 I_n 确定，即当阵列单元位置和远场观测角度确定时，此方向上的电磁辐射强度由各个阵元的电流激励决定，改变各个阵元的电流激励幅度和相位即可改变阵列天线的方向图。

2 遗传算法基本模型

遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程形成的一种自适应全局优化概率搜索算法。它将待求解问题的一个可行解视为一个个体并对其编码，再由许多个体组成一个群体。之后用这个群体模拟生物进化的过程，群体经过遗传、交叉、变异产生新的个体，新的个体根据预定的目标适应度函数进行适应度的判断。对个体进行优胜劣汰，以此模仿生物学中自然淘汰的进化过程。群体经过遗传迭代，各个个体的适应度不断提高，这样就实现了在可行解中的搜索。标准遗传算法模型流程如图 2 所示。

2.1 建立初始群体

遗传算法都是基于一个或多个初始群体开始计算的，初始群体一般被要求在解空间中均匀的分散分布，以便遗传算法对解空间进行全局搜索。群体大小规模也是使用遗传算法解决实际问题时必须考虑的问题，群体规模根据问题的复杂程度决定，越是复杂的问题需要的初始群体规模越大，否则遗传算法无法对解空间进行充分搜索^[6-7]。

对于初始群体中的个体则需要根据具体解决的问题确定染色体的编码长度和编码方式，合适的编码长度可以提高计算效率，减少计算资源的消耗；编码方式则影响到算法复杂

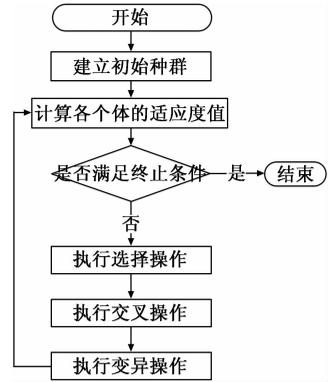


图 2 遗传算法流程图

度与求解精度，编码方式包括二进制编码，实数编码等。

2.2 适应度函数

生物进化过程中适应度 (fitness) 表示了一个生物个体适应环境的能力，也体现了这个个体繁育后代的能力。适应度函数在遗传算法中也被称为评价函数，是对群体中的个体进行优劣判断的标准，应根据求解的问题设计合适的适应度函数。而且遗传算法一般不依赖于其他外部信息，仅依靠适应度函数计算出的适应度值对个体进行是否优劣的判断，适应度值也是后续进行遗传操作时的重要依据。所以根据实际问题设计出合理且适用的适应度函数是在使用遗传算法的过程中重要的一个设计步骤。一般适应度函数的值要求取正值，在不少场合中，将目标函数映射成求最大值形式且函数值非负的适应度函数是必要的^[8]。

2.3 遗传操作

在应用遗传算法进行优化计算时，主要通过遗传操作完成对自然界中遗传变异现象的模拟仿真。遗传操作将根据计算出的个体适应度值对编码产生的群体进行处理，这样就实现了对生物优胜劣汰过程的模拟^[9]。操作由 3 个遗传算子 (genetic operator) 组成，分别是选择 (selection)；交叉 (crossover)；变异 (mutation)。

将适应度更好的个体挑选保留下来并将适应度差的个体剔除的操作叫做选择。被选择操作选择出的个体将作为交叉操作的对象进行下一步处理，部分优秀个体也可通过选择操作直接出现在下一代群体之中。被选择的概率由个体适应度值计算得到，因此在进行选择操作之前必须先行计算个体的适应度值。

将两两配对的编码个体的部分内容进行交换进而重新组合形成新的个体编码的处理叫做交叉。交叉操作作为起关键作用的处理步骤存在于遗传算法之中，交叉操作的存在使遗传算法的搜索能力得到了巨大的提升。最常用的交叉算子为单点交叉。交叉时，在个体编码串中随机选择一个位置作为交叉点，将两个被选中个体该位置前后的两部分进行分配组合形成新的两个个体作为子代。下面给出一个单点交叉的简单例子：

个体 A：
1011 \uparrow 101 \rightarrow 1011 \uparrow 000 新个体

个体 B:

1010 ↑ 000 → 1010 ↑ 101 新个体

对某些个体上的编码值进行改变的操作叫做变异。一般情况下, 变异算子分两步进行: 1) 根据事先设定好的变异概率对群体中的个体进行判断是否需要进行操作; 2) 若判定进行变异操作, 则对需要进行变异操作的个体随机选择其一部分编码结构进行改变。遗传算法中, 变异算子和交叉算子相互配合竞争使算法同时具备全局和局部的搜索能力。

遗传算法计算获得的结果优劣和上述 3 个遗传算子所取的操作概率, 个体编码方法, 群体规模大小, 初始群体的建立以及适应度函数的设定均密切相关。

遗传算法作为一种启发式搜索算法, 对于阵列天线方向图综合这种目标空间巨大且具有不可预测性的复杂优化问题有较高的搜索速率。

3 改进遗传算法

在标准遗传算法模型的基础上进行改进。

3.1 编码方式的选择

虽然实数编码方式不需要进行编码解码的过程节省了计算资源, 但是其遗传操作过程复杂, 而且在工程实现中使用的数控幅相控制器一般也采用二进制编码进行控制, 仍需要将计算结果进行量化使用^[10]。因此, 与采用二进制编码进行计算相比虽然可以提高计算效率, 但是对于需要进行工程实现的问题并不存在明显优势。

在改进算法中仍旧采用二进制编码作为编码方式, 用“0”和“1”编码组成个体的遗传基因型, 其优点在于编码、解码操作简单, 交叉、变异等遗传操作易于实现。同时在遗传算法中采用与实际需要使用的数控幅相控制器位数相同或略多的二进制编码, 可以减小算法需要进行搜索的空间, 并且有利于后期的工程实现。

3.2 改进的适应度函数

适应度函数计算出的适应度是遗传算法中判断个体优劣程度的唯一标准, 一般在阵列天线方向图综合中为了实现对副瓣的抑制的目标, 遗传算法的适应度函数被设计如下:

$$fit = \frac{1}{MSLL - SLVL} \quad (3)$$

其中, $MSLL$ 为最大副瓣相对增益, $SLVL$ 为目标副瓣相对增益, 两者采用归一化 dB 值进行表示。

为实现在对主瓣方向上的增益进行控制的同时实现低的副瓣水平的目标, 在将目标函数映射为适应度函数的过程中增加相关计算来达到目的, 现将适应度函数修改如下所示:

$$fit = a \cdot |G - GT| + b \cdot |MSLL - SLVL| \quad (4)$$

其中, G 为主瓣相对增益, 是将加权控制后的主瓣增益值与未进行加权控制时的主瓣增益值进行归一化处理得到的 dB 值; GT 为目标主瓣相对增益, 同样为与未进行加权控制时的主瓣增益值进行归一化处理得到的 dB 值。 a, b 为调整系数, $a, b \in [0, 1]$ 且 $a + b = 1$, 选取不同的值可以实现对主瓣相对增益与副瓣相对增益在适应度函数中贡献度的调整, 达到在保证主瓣增益值得到满足的情况下对副

瓣相对增益的抑制, 经试验此处取 $a = 0.85, b = 0.15$ 。不过此时越接近目标增益时, fit 函数值越接近于零, 为了方便计算还需要对适应度函数值进行标定。

$$f = \frac{f - \max(fit)}{\min(fit) - \max(fit)} \quad (5)$$

重新标定后的适应度值 $f \in [0, 1]$ 。此时, 当前最接近目标相对增益的个体即最优个体的适应度值 $f = 1$, 适应度值最大; 最差个体的适应度值 $f = 0$, 适应度值最小。

3.3 增加精英保留策略

在遗传算法中通过交叉算子和变异算子产生与父代中不同的新个体, 实现对可行解空间的搜索。因为交叉和变异操作是依照设定的概率随机选择进行的, 所以适应度高的个体仍有可能在遗传迭代的过程中丢失, 即将优秀个体意外淘汰。虽然这是在自然界生物遗传进化中正常发生的情况, 但是对于寻优算法优秀个体的意外淘汰不利于算法的快速收敛, 所以为了有效地防止最优解丢失并加速算法的收敛在交叉、变异产生新一代个体之后增加精英保留策略, 精英保留策略如图 3 所示。

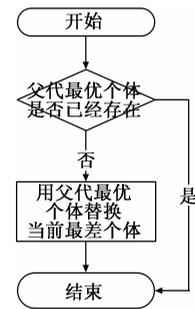


图 3 精英保留策略

精英保留策略使得具有最优适应度值的个体得以保留, 这种个体是搜索进行到当前为止最优的个体。增加精英保留策略之后的遗传算法在理论上已经被证明具有全局收敛性^[11]。

3.4 选择算子的选择

使用轮盘赌选择法 (roulette wheel selection) 构建选择算子, 这种方法最早由 Holland 提出, 是遗传算法中提出相对较早的一种选择算子, 因为它简单实用, 所以被广泛采用。每个个体保留至下一代中的概率由其适应度值大小所决定, 若某个个体的适应度为, 群体大小为, 则它被选择的概率表示为:

$$P_i = f_i / f_{sum} \quad (6)$$

其中: $f_{sum} = \sum_{i=1}^n f_i$ 。计算出的选择概率是对个体适应度值大小的一种转换, 个体的适应度值越好, 则在群体适应度值总和之中所占的比例越高, 那么, 相应的其被选中的概率也越高, 这样优秀个体的基因结构会更多地保留至下一代, 达成算法收敛的效果。每次选择操作只能够选出一个个体, 为了选出足够多的个体进入下一步的交叉操作, 需要进行多次的选择操作, 每次进行选择操作时随机生成新的选择指针, 选择指针一般为在 $[0, 1]$ 上服从均匀分布的随机数。随后, 选中的个体将进行配对, 这个过程是

随机的，配对后的个体即可进行下一步的交叉变异操作。

3.5 改进的交叉、变异操作

交叉操作与变异操作共同作为群体进化的动力源泉存在于遗传算法之中。在算法中将对在同一代中的个体采用不重复交叉和不重复变异的策略。即在同一代进化中，对父代的那些可能发生交叉又或者变异的个体，使其最多只能发生一次交叉或者变异，也就是让同一个父代个体不能多次进行交叉和变异。这样的操作提高了群体之中各种优秀基因的利用率，预防了算法过早地陷入局部最优解。

对于遗传算法计算过程的各项可调整参数，如何进行交叉操作的概率和进行变异操作的概率的方法决定了算法的实现效果与算法的优化性能，采用随进化代数而改变的交叉、变异概率可以提升算法的优化效率。

对于交叉概率 P_c 而言在优化计算的初始时期个体之间的差异比较明显，调整交叉概率进行更多的交叉操作有助于加快收敛；而在优化迭代过程的中、后段，将进行交叉操作的概率减小则可以有效地预防陷入局部最优。所以，将其设置为随进化代数 α 的不断增加而减小。 P_c 随进化代数 α 的关系为：

$$P_c(\alpha) = P_c(\alpha - 1) - \frac{(P_c(0) - P_{c,\min})}{\alpha_{\max}} \quad (7)$$

其中： $P_c(0)$ 为初始状态交叉概率参数，令 $P_c(0) = 0.9$ ； α_{\max} 为设置的最大进化代数； $P_{c,\min} = 0.6$ 为进化后期最小交叉概率，令 $P_{c,\min} = 0.6$ 。

对于交叉概率 P_m 而言，在进化初期，染色体的差异一般较大，变异概率小有助于加快收敛；而在进化的中后期，变异概率增大则有助于防止过早陷入局部最优解。因变异概率本身不大，若像交叉概率一样每一代都进行改变，其每一代的变化并不明显，故将变异概率 P_m 按进化代数分为前中后 3 个阶段，进化前期令 $P_m = 0.08$ ，进化中期令 $P_m = 0.1$ ，进化后期令 $P_m = 0.12$ 。

改进后的遗传算法流程图如图 4 所示。

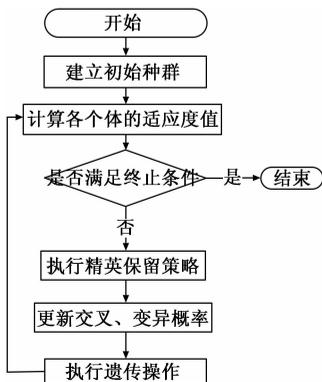


图 4 改进后的遗传算法流程图

4 仿真实验

以阵元间隔的 16 阵元侧射线性阵列天线为例进行仿真实验，以期望的主瓣相对增益和副瓣相对增益为优化目标，采用改进之后的遗传算法对线性阵列天线各单元的激励电

流幅度进行优化。考虑到工程使用的实际需要，阵列天线激励需要各个阵元激励关于中心对称，则优化变量选择阵列一端起的 8 个单元的馈电幅度即可，二进制编码长度选择 10 位，激励电流最大衰减幅度 31.5 dB。目标主瓣相对增益设定为 -1.5 dB，目标副瓣相对增益设定为 -35 dB。

群体大小设定为 64，最大遗传迭代次数设定为 500。表 1 为改进的遗传算法计算得到的归一化之后的激励电流幅度值。

表 1 16 阵元归一化激励电流幅度值

天线单元序号	激励电流归一化幅度
1 和 16	0.6466
2 和 15	0.6175
3 和 14	0.9720
4 和 13	0.6990
5 和 12	0.9023
6 和 11	0.9023
7 和 10	0.9929
8 和 9	0.9894

图 5 分别是改进遗传算法优化所得的线性阵列天线方向图与等幅激励情况和使用切比雪夫综合方法得到具有相同主瓣相对增益的方向图的对比。

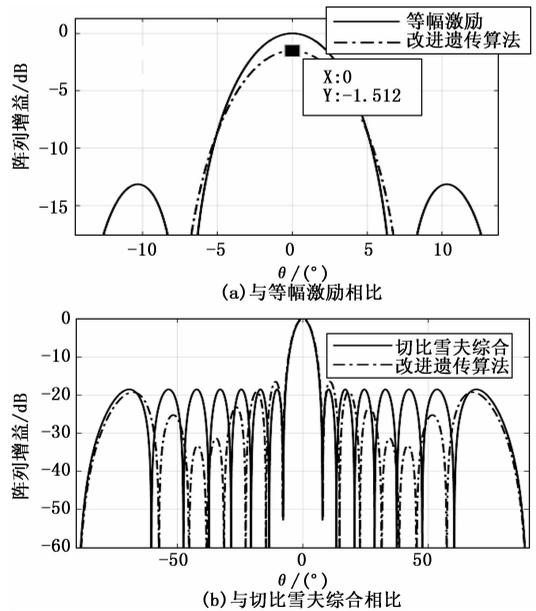


图 5 16 阵元方向图对比

从图 5 (a) 可以看出目标主瓣相对增益 -1.5 dB 基本达到，而从图 5 (b) 中可以发现副瓣情况相对于切比雪夫综合算法更优，但是仍只有极少部分的副瓣达到了目标副瓣相对增益设定的一 35 dB。

5 结束语

通过对遗传算法中适应度函数的重新设计，在线性阵列天线方向图综合中成功的在保持期望的主瓣相对电平的前提下，获得了拥有低副瓣特性的阵列天线方向图。令外

通过增加精英保留策略, 改进交叉、变异概率, 使遗传算法具有更高的有效性。以阵元间隔的 16 阵元线性阵列天线为例进行了阵列天线方向图综合的仿真实验, 实验结果表明相比于切比雪夫综合算法在获得同样的主瓣相对增益时可以获得更好的低副瓣效果。对于阵列天线方向图综合这类有着特殊要求的优化问题, 智能优化算法能够提供有效的解决途径, 相比于传统算法更加便捷有效, 这类算法除遗传算法外还包括模拟退火算法、蚁群算法、粒子群算法等。

参考文献:

[1] 周志伟, 王志国. 平面阵低旁瓣波束形成方法研究 [J]. 无线电工程, 2018, 48 (1): 29 - 32.
 [2] 刘欢欢, 郑占奇, 朱雄志, 等. 基于改进型遗传算法的超低副瓣阵列天线 [J]. 滨州学院学报, 2016, 32 (4): 70 - 74.
 [3] 赵麟, 高申玮, 蔚保国, 等. 一种低副瓣阵列天线指数幅度加权算法及仿真 [J]. 无线电通信技术, 2015, 41 (2): 38 - 40.

[4] 蒋毅. 低副瓣天线阵列的稀疏优化技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
 [5] 吴海洲, 王鹏毅, 郭肃丽. 全空域相控阵测控系统波束形成分析 [J]. 无线电工程, 2011, 41 (11): 13 - 15.
 [6] 梁宇宏, 陈星, 温剑, 等. 改进遗传算法应用于超低副瓣天线阵的综合设计 [J]. 微波学报, 2010, 26 (4): 47 - 50.
 [7] 边莉, 车向前, 杨国辉, 等. 基于遗传算法的低副瓣阵列天线综合 [J]. 计算机应用, 2008 (7): 1656 - 1658.
 [8] 李东风, 龚中麟. 遗传算法应用于超低副瓣线阵天线方向图综合 [J]. 电子学报, 2003 (1): 82 - 84.
 [9] 董涛, 徐晓文. 遗传算法在低副瓣天线阵综合中的应用 [J]. 北京理工大学学报, 2001 (6): 770 - 773.
 [10] 申建华, 郑晓冬, 赵麟. 基于遗传算法的波束形成算法研究 [J]. 无线电通信技术, 2015, 41 (3): 83 - 85.
 [11] Fauzi M J. A Review of Genetic Algorithms and Parallel Genetic Algorithms on Graphics Processing Unit (GPU) [C]. IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), 2013.

(上接第 126 页)

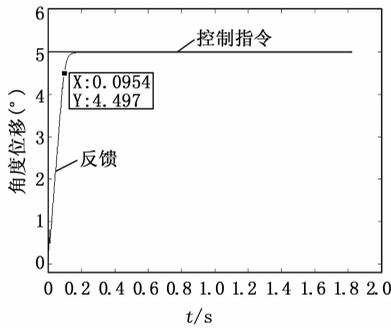


图 27 5°阶跃输入的条件仿真结果

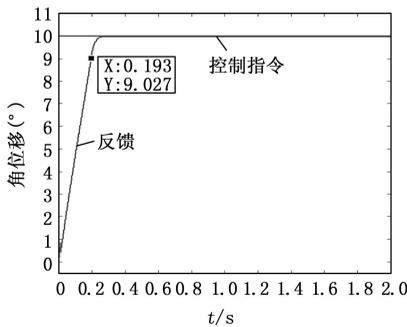


图 28 10°阶跃输入的条件仿真结果

经过计算, 在±10°、±20°情况下的频率特性与在 0°的频率特性基本一致, 满足系统指标要求。

6 结束语

本文以电气双余度控制和双绕组永磁同步电机为关键技术, 设计的舵伺服系统具有承载能力强、质量小、可靠性高等特点, 满足了空天飞行器的要求。舵伺服系统已交付航天总体单位, 整机使用无问题, 有广泛的应用前景。

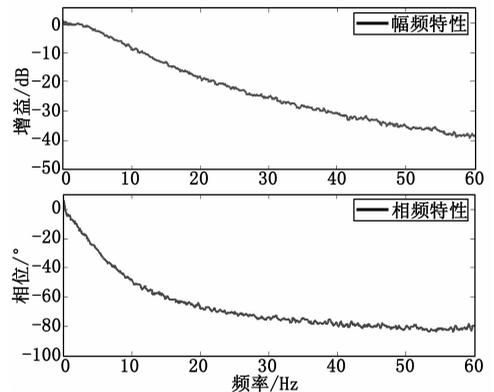


图 29 频率特性仿真结果

参考文献:

[1] 蔡国飙, 徐大军. 高超声速飞行器技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
 [2] 王立宁. 空天飞行器气动技术研究 [J]. 战术导弹技术, 2018 (4): 32 - 33.
 [3] 汪军林, 解付强, 刘玉浩. 导弹电动舵机的研究现状及发展趋势 [J]. 控制与制导, 2008 (3): 42 - 43.
 [4] 秦文甫. 基于 DSP 的数字化舵机系统设计与实现 [D]. 北京: 清华大学, 2004.
 [5] 杨柳. 浅谈 1553B 总线及其应用发展 [J]. 科技之友, 2012 (4): 159 - 160.
 [6] 丁明亮, 庄喜盈, 王虎峰. 1553B 总线控制器设计与调试 [J]. 计算机与信息技术, 2009 (6): 12 - 13.
 [7] 程江婷. 双余度电作动器的闭环控制系统研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2000: 1 - 2.
 [8] 刘彬, 刘景林, 马瑞卿. 双余度永磁无刷直流电机驱动控制系统 [J]. 微电机, 2004, 37 (1): 26 - 28.
 [9] 陆军, 张元国, 王长路. 电动舵机余度技术概述 [J]. 机械传动, 2010 (3): 92 - 93.
 [10] 付永领, 裴忠才, 王占林. 伺服作动系统的余度控制 [J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25 (5): 531 - 534.