

无人机微波着陆引导设备扫描波束指向精度改进方法

韩 昆, 赵颖辉, 吴德伟

(空军工程大学信息与导航学院,西安,710077)

摘要 无人机微波着陆引导设备为提高机动性减少了相控阵扫描天线阵元数目,使得扫描波束展宽、主瓣对称性变差,这会使原有馈相方法的扫描波束指向精度及其鲁棒性降低,设备保障能力减弱。针对这一问题,提出一种将相位循环法与改进遗传算法组合使用以提高扫描波束指向精度的方法。在各扫描指向上,每增加一个相位循环常量进行一次改进遗传算法优化,确定最终的各移相器输入值及其量化方式,克服相位循环法与基本遗传算法单独使用时的不足。仿真分析表明,组合方法产生的扫描波束指向精度优于随机馈相法以及基本遗传算法产生的扫描波束指向精度。

关键词 量化误差;相位循环法;改进遗传算法;波束指向精度

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.05.004

中图分类号 V249.3;TN820.2 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)05-0015-05

Research on Method of Improving Scanning Beam Pointing Accuracy in UAV Microwave Landing Navigation System

HAN Kun,ZHAO Yinghui,WU Dewei

(Information and Navigation College,Air Force Engineering University,Xi'an 710077,China)

Abstract: Microwave landing navigation system is used for UAV reducing the number of phased array scanning antenna to improve its maneuverability, by so doing, this makes scanning beam wide and main-beam's symmetry worse. The phenomenon can reduce the scanning beam pointing accuracy and robustness of original phasing methods, and consequently weaken the navigation ability. Aimed at the problem, a new method of the combined circle-phase method with the improved genetic algorithm is proposed to improve the scanning beam pointing accuracy. At every scanning pointing, whenever a circle-phase constant is added, the genetic algorithm is improved to optimize, determine the final phase shifters' input values and quantization manners, and overcome the shortage of circle-phase method and basic genetic algorithm in using alone. The simulation shows that the beam pointing accuracy produced by the combination method is superior to the beam pointing accuracy produced by random phasing methods and basic genetic algorithm.

Key words: Quantitative phase error; circle-phase method; improved genetic algorithm; beam pointing accuracy

收稿日期:2014-12-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61473308)

作者简介:韩 昆(1990-),男,山东潍坊人,硕士生,主要从事飞行器着陆引导与自主导航研究.E-mail: hk199009@126.com

引用格式:韩昆,赵颖辉,吴德伟.提高无人机微波着陆引导设备扫描波束指向精度的方法研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(5):15-19. HAN Kun,ZHAO Yinghui,WU Dewei.Research on Method of Improving Scanning Beam Pointing Accuracy in UAV Microwave Landing Navigation System[J].Journal of Air Force Engineering University:Natural Science Edition,2015,16(5):15-19.

微波着陆引导设备作为目前最先进的地面导航手段,提供稳定、高精度的角度测量信息是其完成保障任务的关键。测角波束由相控阵扫描天线反射。

天线移相器量化误差引起的波束指向误差是机载接收机产生测角误差的重要原因之一。若测角误差仅由波束指向误差引起,则根据接收机测角原理,测角误差等于波束指向误差;当接收机内部方位解算各过程存在误差时,测角精度会进一步降低。微波着陆引导设备现有的馈相方法主要有确定馈相法和随机馈相法^[1-2]。确定馈相法易于实现,但是在每个扫描指向上会产生一个固定指向误差;随机馈相法是统计平均意义上的最优,所产生的扫描波束在不同的扫描位置及周期内均不稳定。

无人机微波着陆引导设备为提高机动性减少了扫描天线阵元的数目,使得扫描波束展宽、主瓣对称性变差,降低了原有馈相方法的扫描波束指向精度及其鲁棒性。遗传算法可以实现移相器量化方式的优化选取,减小波束指向误差^[3-4]。然而,现有文献主要是在移相器输入值相同时地较遗传算法、确定馈相法以及随机馈相法得到的波束指向误差,并不涉及移相器输入值不同时遗传算法得到的波束指向误差,并且基本遗传算法的结果容易陷入局部最优中。因此,为了进一步优化每个指向上的移相器输入值及其量化方式,对遗传算法进行改进并且比较不同移相器输入值时的波束指向误差是非常必要的。本文提出相位循环法与改进遗传算法的组合方法,并通过仿真验证了其提高扫描波束指向精度的可行性。

1 相位循环法与改进遗传算法

1.1 相位循环法及其不足

相位循环法是使波束指向误差随机化的一种简单方法。根据在所有阵元上同时增加一个相同相位波束指向不会发生变化的原理,在每次步进扫描时,在所有移相器的输入端增加一个相同的相位循环常量,然后各移相器依然采用确定馈相法。但是,由于量化台阶的存在,每个阵元实际增加的相位并不完全相同。因此,从整体上看,相位循环法可以使每个指向上的量化误差随机化,提高部分指向的波束指向精度。

虽然相位循环法与确定馈相法同时使用使得波束指向呈现随机馈相法的特点,但这并不能从根本上提高波束指向精度及其鲁棒性。

1.2 改进遗传算法

遗传算法是模仿自然界生物进化机制发展起来

的随机全局搜索和优化方法,无人机微波着陆引导设备中对各移相器量化方式的选取过程就是一个求解全局最优解的过程。为了提高算法的全局和局部搜索能力,将分组算子、高斯变异算子以及免疫选择算子引入到遗传算法中^[5-8]。改进遗传算法优化进程如下:

步骤 1 设定种群规模为 K , 种群最大分组次数为 MAX_K , 随机生成初始种群。

步骤 2 利用分组算子将种群分为 L 组, 设定每组迭代次数为 MAX_L 。

步骤 3 在每组种群中应用遗传算法: ①将种群中的个体随机两两配对, 每一对依据交叉概率决定交叉基因位, 进行基因值交换; ②对交叉变换中的父代和子代进行高斯变异; ③计算变异变换中的父代和子代的适应度值和浓度值, 并确定每个个体的免疫选择概率, 依据此选择个体, 组成新种群。

步骤 4 每组种群迭代完成后将所有的个体混合, 执行步骤 2。

步骤 5 分组次数达到要求值后, 停止迭代, 输出最优解。

与基本遗传算法相比, 改进遗传算法对选择、变异算子进行了改进, 还增加了分组算子, 提高算法的全局搜索能力。分组算子在 FPGA 中可以并行实现^[9-11]。因此, 改进遗传算法虽然计算量增加了, 但是运算时间并不会增加。

2 基于组合方法的移相器输入值及其量化方式的选取

2.1 无量化误差时扫描波束分析

无人机微波着陆引导设备方位台扫描天线和仰角台扫描天线工作原理相同, 以前者为例进行分析。在没有移相器量化误差时扫描天线阵列因子为:

$$F(\theta) = \sum_{n=1}^N I_n \exp\left\{j \left[(n-1) \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta - S_{\theta_0} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

式中: N 为天线阵元数; I_n 为第 n 个阵元的激励电流峰值; d 为阵元间距; λ 为扫描信号波长; θ 为扫描天线的扫描范围; S_{θ_0} 为波束理想指向 θ_0 时移相器相位增量。进而可得功率方向图函数为:

$$P(\theta) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N I_n I_m \cos \left[(m-n) \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta - S_{\theta_0} \right) \right] \quad (2)$$

根据机载接收机测角原理, 假设接收机位于 φ ($-42^\circ \leq \varphi \leq 42^\circ$) 方向上, 理想指向为 $\varphi - 2^\circ \sim \varphi + 2^\circ$ 的扫描波束被接收机接收, 则接收机测得的各功率值为:

$$p(\varphi) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N I_n I_m \cos \left[(m-n) \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\varphi - \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_0 \right) \right] = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N I_n I_m \cos \left[(m-n) \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_0 - \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\varphi \right) \right] \quad (3)$$

其中, θ_0 以 0.1° 步进由 $\varphi - 2^\circ$ 扫描到 $\varphi + 2^\circ$ 。对测得的功率值低通滤波得到与理想波束指向为 φ 时的扫描波束主瓣相同的脉冲。

相控阵天线的扫描波束存在展宽效应^[12], 假设波束理想指向为 0° 时主瓣半功率点宽度为 $\Omega_{0.5}$, 则当波束理想指向为 θ_0 时, 主瓣半功率点宽度为 $\Omega_{0.5} / \cos\theta_0$ 。此外, 扫描波束主瓣存在非对称特征, 扫描波束主瓣半功率点中间位置与最大功率点指向的偏差随着扫描角度的增大逐渐变大, 因此即使没有移相器量化误差, 机载接收机也可能产生测角误差。

2.2 改进遗传算法适应度函数的确定

数字移相器的使用带来了馈相上的量化误差, 引入量化误差后, 波束理想指向为 θ_0 时扫描天线功率方向图函数为:

$$P_\delta(\theta) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N I_n I_m \cos \left[(m-n) \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta - S_{\theta_0} \right) + (\delta_m - \delta_n) \right] \quad (4)$$

式中: δ_n 为第 n 个阵元的馈相量化误差。

量化误差的引入既使得波束指向发生改变, 又使得波束主瓣的非对称特征发生改变, 选取的指向度量基准不同, 遗传算法的适应度函数也就不同。本文以主瓣最大功率点指向作为波束指向进行分析, 在理想指向为 θ_0 方向上, 若引入量化误差后要求不产生波束指向误差, 则需要:

$$[P_\delta'(\theta_0)]^2 = \left[\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N (m-n) I_n I_m \sin(\delta_m - \delta_n) \right]^2 = 0 \quad (5)$$

无人机微波着陆引导设备要求扫描波束的最大旁瓣功率小于 -18 dB, 即:

$$D = 10 \log_{10} \left[\frac{P_\delta(\theta)}{P_\delta(\theta_0)} \right] < -18, \theta \text{ 为旁瓣区域} \quad (6)$$

运用改进遗传算法优化对移相器量化方式需要同时考虑扫描波束的指向和最大旁瓣功率。当没有量化误差时, 扫描波束最大旁瓣功率 $D_{\max} > -35$, 量化误差的引入使得最大旁瓣功率升高, 因此适应度函数可表示为:

$$\text{Min: } \frac{1}{\lfloor |D|/18 \rfloor + 10^{-3}} [P_\delta'(\theta_0)]^2 \quad (7)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。

2.3 组合方法的应用

根据上述对相位循环法、改进遗传算法以及扫

描波束特征的分析, 无人机微波着陆引导设备运用相位循环法与改进遗传算法的组合方法进行移相器输入值及其量化方式的优化选取步骤如下:

步骤 1 设每个扫描角度上相位循环常量增加次数为 M , 各相位循环常量可表示为 $m \cdot \Delta / (M+1)$, ($m=1, 2, \dots, M$)。

步骤 2 在每个扫描指向上, 各移相器首先以网络相位误差补偿值与移相器相位增量值之和作为其初始输入相位值, 然后以式(7)作为适应度函数, 以初始输入相位值及其增加一个相位循环常量后的数值分别作为各移相器实际输入值, 运用改进遗传算法进行移相器量化方式的优化选取。每个扫描角度完成 $M+1$ 次优化。

步骤 3 每完成一次优化, 进行适应度函数值(代表波束指向误差)的比较, 记下使适应度函数值最小的一组移相器输入值及其量化方式。

步骤 4 对每个扫描角度上各移相器的最终输入相位值及其量化方式分别存储, 用于波束扫描时被调用。

文献[9~11]对遗传算法在 FPGA 中的并行实现进行了介绍, 并行方法比传统方法的效率大大提高。因此改进遗传算法实现移相器量化方式优化的过程可以尽可能并行运行。相位循环常量增加次数的选取可以根据设备可用预备时间的长短通过数据终端设定。

3 仿真验证

对无人机微波着陆引导设备方位台扫描天线进行仿真, 阵元数 N 为 42, 阵元间距 d 与波长 λ 的关系为 $d = 0.55\lambda$, 阵元激励电流峰值 I_n 采用泰勒分布。分别在波束理想指向为 20° 、 40° 方向上对随机馈相法、基本遗传算法和组合方法进行仿真分析。考虑到网络相位误差对移相器量化误差的影响, 随机产生 3 组数值分别作为移相器的网络相位误差补偿值(相位误差补偿值 1, 2, 3), 然后计算出每组相位误差补偿值对应的各移相器的初始输入相位值。

1) 随机馈相法。3 组移相器输入值的每一次量化方式均随机选取, 每一组进行 50 次取值, 分别计算波束指向误差的均值和方差。图 1 为运用随机馈相法时波束指向误差均值和标准差的变化情况。

通过图 1 可以看出, 随机馈相法对波束指向误差的影响与相位误差补偿值和取值次数有关。随着取值次数的增加, 指向误差均值逐渐趋于稳定, 取值 45 次以后, 20° 指向上指向误差均值的绝对值最大为 0.0081° , 最小为 $3.77 \times (10^{-5})^\circ$; 40° 指向上相位

误差补偿值 1 时指向误差趋近于 0.042° , 相位误差补偿值 2、3 时指向误差趋近于 0.007° 。

2) 基本遗传算法。仿真时, 种群规模为 200, 迭代次数为 200; 交叉时采用单点交叉法, 交叉概率为 0.7; 变异概率为 0.05。由于基本遗传算法容易陷入

局部最优中, 每次优化得到的结果可能不同, 因此对每一组移相器初始输入值进行 5 次优化, 计算波束指向误差绝对值的均值和标准差。表 1 为运用基本遗传算法产生的波束指向误差, 单位为 $(10^{-5})^\circ$ 。

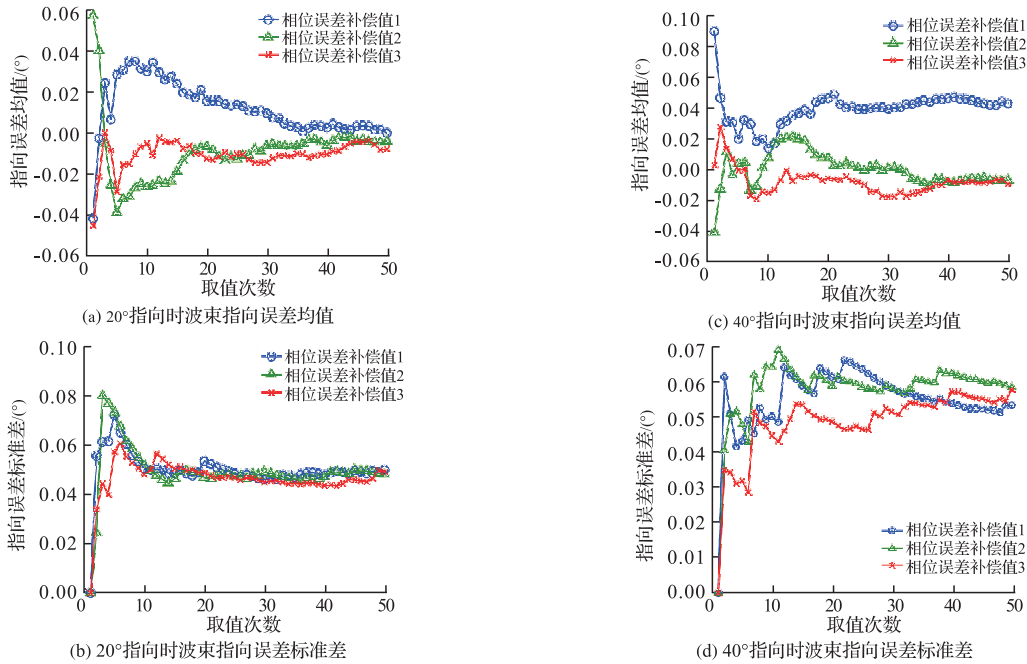


图 1 运用随机馈相法时波束指向误差的统计结果

Fig.1 Statistics of beam pointing error produced by random phasing method

表 1 基本遗传算法产生的波束指向误差

Tab.1 Beam pointing error produced by basic genetic algorithm

指向	相位误差补偿值	5 次基本遗传算法优化产生的波束指向误差					绝对值均值	绝对值标准差
		1	2	3	4	5		
20°	1	-16.3	-7.50	4.70	-14.8	-0.60	8.87	5.97
	2	-3.10	7.70	71.5	5.70	-7.00	19.0	26.3
	3	5.50	-1.40	-66.9	30.3	2.80	21.4	25.1
40°	1	-21.0	31.7	32.8	-11.6	5.20	20.5	12.1
	2	24.2	0.70	3.00	-1.20	-7.40	7.30	9.80
	3	3.10	-58.7	1.30	-14.8	-17.1	19.0	23.3

通过表 1 可以看出, 基本遗传算法产生的波束指向误差受其容易局部收敛的影响, 波束指向误差可能为 10^{-4} 数量级也可能为 10^{-6} 数量级。

3) 组合方法。仿真时, 种群规模为 200, 种群最大分组次数为 10; 利用分组算子将种群分为 5 组, 每组迭代次数为 100; 交叉时采用单点交叉法, 交叉

概率为 0.7。对每组移相器初始输入值进行 2 次相位循环常量累加, 每次累加常量为 7.5° , 运用改进遗传算法对产生的各组移相器输入值进行优化, 分析每组产生的波束指向误差。表 2 为组合方法产生的波束指向误差。单位为 $(10^{-5})^\circ$ 。

表 2 组合方法产生的波束指向误差

Tab.2 Beam pointing error produced by combination method

指向	相位误差补偿值 1		相位误差补偿值 2		相位误差补偿值 3	
	20°	40°	20°	40°	20°	40°
初始输入相位值	0.7	5.1	-1.6	0.9	-1.9	1.7
相位循环常量为 7.5°	0.9	7.8	3.3	-2.6	-1.3	-1.4
相位循环常量为 15°	-1.5	-11.1	-1.1	4.7	0.9	2.9
相位循环常量为 22°	0.7	5.1	-1.1	0.9	0.9	-1.4

通过表2可以看出,改进遗传算法可能产生 10^{-5} 或 10^{-6} 数量级的波束指向误差,通过相位循环法改变移相器量化误差并且对波束指向误差进行最优比较,可以得到稳定的高精度扫描波束。

对比以上3种方法可以看出,随机馈相法在取值达到一定次数后波束指向误差在某一范围内浮动,基本遗传算法在每个扫描指向上产生一个固定的波束指向误差,但是易受其局部收敛的影响,波束指向精度不稳定;组合方法同样是在每个扫描指向上产生一个固定的波束指向误差,虽然改进遗传算法的运算结果可能差于基本遗传算法的某一次运算结果,但是与基本遗传算法相比,改进遗传算法的全局搜索稳定性得到提高,而且相位循环法实现了多个波束指向误差的比较,因此组合方法的扫描波束指向精度及鲁棒性优于其他两种方法。

4 结语

本文在分析相位循环法、基本遗传算法优缺点的基础上,提出了一种方法,将相位循环法与改进遗传算法组合使用克服各自单独使用时的不足,以提高无人机微波着陆引导设备扫描波束指向精度的方法。通过在 20° 、 40° 波束指向上分别对随机馈相法、基本遗传算法以及组合方法产生的波束指向误差进行仿真分析,验证了组合方法产生的扫描波束的指向精度优于随机馈相法以及基本遗传算法产生的扫描波束的指向精度。

参考文献(References):

- [1] 沈文辉,周希朗,彭根建.相控阵天线零相位误差法的波束指向分析[J].上海交通大学学报,2004,38(S):87-89.
SHEN Wenhui, ZHOU Xilang, PENG Genjian. Analysis for Improving the Beam-Steering Accuracy of Phased Array Antenna by Zero Mean Phase Error Method[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004,38(S):87-89.(in Chinese)
- [2] Wei Jiang, Yanchang Guo, Tinghua Liu, Wenfei Shen, Wei Cao. Comparison of Random Phasing Methods For Reducing Beam Pointing Errors in Phased Array [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2003,51(4): 782-787.
- [3] 李秋生.基于遗传算法的相控阵随机馈相方案的优化[J].系统工程与电子技术,2006,28(6):861-863.
LI Qiusheng. Optimizing of Randomizing Phase Feeding Schemes for Phased Array Based on Genetic Algorithms[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006,28(6):861-863.(in Chinese)
- [4] 周强锋.基于改进遗传算法的相控阵适当随机馈相方法[J].现代雷达,2013,35(10):50-53.
ZHOU Qiangfeng. Appropriate Random Phasing Technique for Phased Array Antennas Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Modern Radar, 2013,35(10):50-53.
- [5] YiminSun, DirkJacob(Eric)Verschuur. A Self-Adjustable Input Genetic Algorithm for the Near-Surface Problem in Geophysics[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation.2014,18(3):309-325
- [6] Azuma Okamoto, Mitsumasa Sugawara. Solving Composite Scheduling Problems Using the Hybrid Genetic Algorithm[J]. Journal of Zhejiang university -SCIENCE A (Applied Physics & Engineering), 2010,11(12):953-958.
- [7] Sertac Karaman, Tal Shima, Emilio Frazzoli. A Process Algebra Genetic Algorithm [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2012,16(4):489-503.
- [8] 杨淑莹,张桦.群体智能与仿生计算[M].北京:电子工业出版社,2012.
YANG Shuying, ZHANG Hua. Colony Brain-power and Bionics Calculate[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.(in Chinese)
- [9] 张妮娜,窦衡.并行化改进遗传算法的FPGA高速实现方法[J].信息与电子工程,2012,10(1):107-110.
ZHANG Nina, DOU Heng. Methodology of realizing FPGA for improved parallel genetic algorithm [J]. Information and Electronic Engineer, 2012,10(1):107-110.
- [10] 周艳聪,顾军华,董永峰,等.遗传算法FPGA硬件实现[J].计算机工程与应用,2011,47(20):9-14.
ZHOU Yancong, GU Junhua, DONG Yongfeng, et al. Hardware Implementation of Genetic Algorithm Based on FPGA[J]. Computer Engineering and Applications, 2011,47(20):9-14.(in Chinese)
- [11] Jason Cong, Bingjun Xiao. FPGA-RPI: A Novel FPGA Architecture with RRAM-Based Programmable Interconnects[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (vlsi) System, 2014,22(4):864-877.
- [12] 陈志杰,李永祯,戴幻尧,等.相控阵天线方向图的建模与实时仿真方法[J].计算机仿真,2011,28(3):31-35.
CHEN Zhijie, LI Yongzhen, DAI Huanyao, et al. Modeling and Real-time Simulation of Phased-array Antenna's Directional Pattern[J]. Computer Simulation, 2011,28(3):31-35.(in Chinese)

(编辑:徐敏)