

文章编号: 1007-2780(2024)07-0919-10

## 基于 G&L-HHO 的光束指向精度优化算法

王哲<sup>1</sup>, 胡奇<sup>2\*</sup>, 耿辉<sup>1</sup>, 田嘉政<sup>1</sup>, 韦宇宁<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130013;

2. 长春理工大学人工智能学院, 吉林 长春 130013)

**摘要:** 指向精度是光束控制领域最核心的指标之一, 指向精度的高低直接决定了光束控制器性能的优劣。为了解决液晶相控阵受制作工艺限制会造成较大光束偏转角度误差、指向精度下降等问题, 本文提出一种基于改进哈里斯鹰(HHO)的光束指向精度优化算法。首先, 对影响因素进行分析, 选取合理的器件参数。随后, 采用哈里斯鹰算法对液晶相控阵进行光束指向精度优化。最后, 鉴于哈里斯鹰算法容易陷于局部最优值的难题, 本文设计了兼顾全局与局部并优策略的哈里斯鹰算法(G&L-HHO)。在全局优化策略方面, 选择柯西分布函数增加初始种群多样性, 提高算法的全局搜索效率; 在局部优化策略方面, 采用自适应余弦加权因子, 多方面增强哈里斯鹰算法的寻优性能。仿真实验对比结果表明, 本研究提出的 G&L-HHO 算法将归一化精度误差由  $10^0$  数量级优化为  $10^{-4}$  数量级, 并大幅降低了归一化精度误差波动幅度。本研究显著提高了光束指向精度, 并具有收敛精度高、收敛速度快、鲁棒性强等优点。

**关键词:** 液晶相控阵; 光束偏转; 指向精度优化; 哈里斯鹰优化算法

中图分类号: TN29 文献标识码: A doi: 10.37188/CJLCD.2023-0207

## Optimization algorithm of beam pointing accuracy based on G&L-HHO

WANG Zhe<sup>1</sup>, HU Qi<sup>2\*</sup>, GENG Hui<sup>1</sup>, TIAN Jiazheng<sup>1</sup>, WEI Yuning<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun 130013, China;

2. College of Artificial Intelligence, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun 130013, China)

**Abstract:** Pointing accuracy is one of the core indicators in the field of beam control, and the level of pointing accuracy directly determines the performance of the beam controller. In order to solve the problems of large beam deflection angle error and deterioration of pointing accuracy caused by the limitation of liquid crystal phased array fabrication process, a beam pointing accuracy optimization algorithm based on improved Harris hawk optimization algorithm (HHO) is proposed. First, the influencing factors are analyzed, reasonable device parameters are selected. Then, the Harris hawk algorithm

收稿日期: 2023-06-07; 修订日期: 2023-07-23.

基金项目: 吉林省教育厅科技专项(No. JJKH20210835KJ)

Supported by Science and Technology Special Project of Jilin Provincial Education Department (No. JJKH20210835KJ)

\*通信联系人, E-mail: huqi@cust.edu.cn

(HHO) is used to optimize the beam pointing accuracy of the liquid crystal phased array. Finally, in view of the difficulty of the Harris hawk algorithm being easily trapped in the local optimal value, this paper designs the Harris hawk algorithm that takes into account the overall and local optimization strategies (G&L-HHO). In terms of the global optimization strategy, the Cauchy distribution function is selected to increase the initial population diversity and improve the algorithm's global search efficiency. In terms of local optimization strategies, the optimization performance of the Harris hawk algorithm is enhanced through adaptive cosine weighting factors. The comparative results of simulation experiments show that the G&L-HHO algorithm proposed in this study optimizes the normalization accuracy error from  $10^0$  orders of magnitude to  $10^{-4}$  orders of magnitude, and greatly reduces the fluctuation amplitude of normalization accuracy error. This study significantly improves the accuracy of beam pointing and has advantages of high convergence accuracy, fast convergence speed, and strong robustness.

**Key words:** liquid crystal phased array; beam deflection; pointing accuracy optimization; Harris hawks optimization algorithm

## 1 引言

光束偏转技术<sup>[1-6]</sup>被应用在激光雷达、空间光通信、生物医学和军事等许多方面,其目的是控制光束在一定空域内进行精准的动态指向,其具有精准、隐蔽性好、抗有源干扰能力强等优势。光束的指向精度常作为光束偏转系统的重要评价指标,是光学动态捕获、跟踪、指向技术中最关键的参量之一。

传统光束偏转技术使用伺服系统驱动机械转动机构去引领天线或者光束的偏移,存在体积大、功耗比较高、指向速度较慢、偏转精准度较低、抗振动性较弱等缺点。由微波领域的相控阵天线技术演变而来的光学相控阵(OPA)技术为解决这个难题提供了一种关键解决办法。

液晶相控阵<sup>[7-12]</sup>属于光学相控阵<sup>[13]</sup>的一类,它拥有高分辨率、高精度、可以编程操控等特性,但在光束调制过程中难免受边缘效应、电极占空比、电压量化等因素影响,会导致波阵面产生畸变,产生角度偏转误差,降低了光束指向精度。

自 20 世纪末以来,许多学者针对液晶相控阵的光束指向精度优化问题进行了研究。2009 年,孔令讲等人分析了电压量化对光束指向精度的影响,但没有对其进行优化实验<sup>[8]</sup>。2018 年,黄志伟等人使用蝙蝠优化算法优化光束指向精度,仿真结果与粒子群算法相比,收敛速度较快,但优化精度没有显著提升<sup>[9]</sup>。2021 年,王承邈等人提出将预设子光斑尺寸约束至衍射极限以统一

实际光斑形貌的光学优化方法,在此基础上引入指向位置的变步长反馈矫正过程,但其缺点是准备阶段工作量巨大<sup>[10]</sup>。

总体而言,上述关于液晶相控阵指向精度的研究都有或多或少的缺点。本文针对光束指向精度优化问题,设计了全局与局部并优策略的哈里斯鹰算法(G&L-HHO)对液晶相控阵进行光束指向精度优化,对减少光束在长距离传输过程中的指向精度误差具有重大意义。

## 2 光束偏转模型与影响因素分析

### 2.1 连续角度偏转模型

本研究首先基于相控阵雷达相位调制原理<sup>[14]</sup>搭建光束连续偏转角度模型,将所有离散相控单元看作一个整体。

图 1 中相控单元间的距离为  $d$ , 阵元相位调制量为  $0, \phi, 2\phi, \dots, (N-1)\phi$ , 光束经过各阵元相位调制改变出射波阵面,从而实现光束偏转。

因为每个阵元都为离散电极,所以我们可以

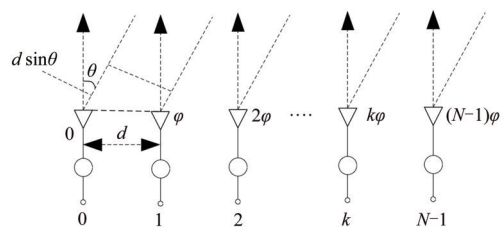


图 1 相控阵雷达波控原理

Fig.1 Beam control principle of phased array radar

对液晶相控阵加以台阶式分布的电压,即可获取阶梯状分布的相位面。进行光束偏转时,只需通过调控电压控制相邻相控单元间的相位差即可,出射光的偏转角度为:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda\Delta\phi}{2\pi d}\right), \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 为光束波长, $d$ 为阵元尺寸, $\Delta\phi$ 为相位差。图2中表示的是理想情况下,仿真参数在入射光束波长 $\lambda=1.064\ \mu\text{m}$ 、阵元尺寸 $d=5\ \mu\text{m}$ 时,偏转角度与相控单元间的相位差关系。

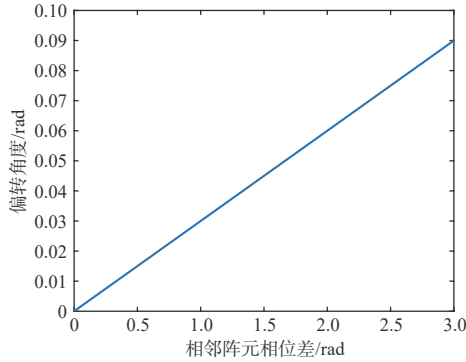


图2 连续角度偏转模型的偏转角度分布示意图

Fig.2 Schematic diagram of deflection angle distribution of continuous angle deflection model

由图2可知,理想状态下,改变相邻阵元的驱动电压产生相位差就能实现任意角度的光束偏转,但面对前文提到的影响因素,高精度的光束偏转仍是研究难点。

## 2.2 影响因素分析

在光束偏转技术中,光束传播会受到器件自身影响与外部环境扰动。外部环境因素无法定性,但可以通过数学模型对器件自身影响进行模拟。

本研究定义归一化精度误差 $\epsilon_{\text{norm}}$ 为实际偏转角度 $\theta_{\text{actual}}$ 和理想角度 $\theta_{\text{ideal}}$ 的差值与光束宽度之比,即:

$$\epsilon_{\text{norm}} = \left| \frac{\theta_{\text{actual}} - \theta_{\text{ideal}}}{\theta_{\text{spot}}} \right|, \quad (2)$$

式中: $\theta_{\text{spot}} = \lambda/Nd$ 为光束宽度,偏离程度为 $\Delta\theta = \theta_{\text{actual}} - \theta_{\text{ideal}}$ ;  $\epsilon_{\text{norm}}$ 值越接近于0,偏转误差就越小,表示精度越高。以下几种影响因素会影响出射光的相位分布<sup>[11]</sup>,进而造成与理想偏转角度偏差。

### 2.2.1 边缘效应

液晶分子由于其自身具有粘连性,会导致电极之间波阵面变平滑。当相位跨度很大时,产生的相位干扰将形成一个回程区,其也被称作液晶相控阵的边缘效应<sup>[15]</sup>。

受回程区影响,实际相位分布 $\phi(x)$ 表示为:

$$\phi(x) = \varphi(x) \otimes k(x), \quad (3)$$

$$k(x) = \begin{cases} (1/\sigma) \exp(2x/\sigma), & x < 0 \\ (1/\sigma) \exp(-2x/\sigma), & x > 0 \end{cases}, \quad (4)$$

其中: $\varphi(x)$ 代表理想相位分布, $k(x)$ 为高斯核函数, $x$ 为液晶表面位置坐标。由此可计算出液晶后表面位置与相位延迟关系。

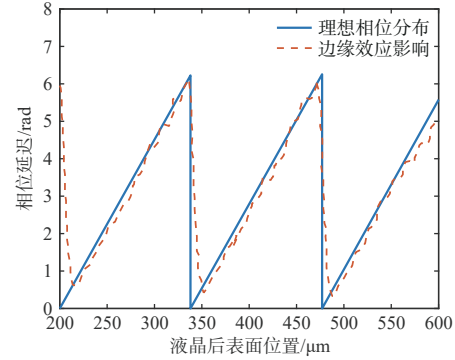


图3 受边缘效应影响的相位分布

Fig.3 Phase distribution affected by edge effects

图3表示受边缘效应影响造成的相位延迟,但相位延迟还受液晶层厚度的限制,具体公式如式(5)所示:

$$\sigma(h) = \sqrt{\frac{\epsilon_{\parallel}}{3\epsilon_{\perp}}} \left[ h - \frac{\lambda(\epsilon_{\parallel}^2 - \epsilon_{\perp}^2)n_o^2}{2\epsilon_{\parallel}\epsilon_{\perp}(n_e^2 - n_o^2)n_e} \right], \quad (5)$$

其中: $\sigma$ 表示高斯核函数的有效宽度,体现边缘效应的强度大小; $h$ 为液晶层厚度。获得的结果代入公式(1)与公式(2)中,获得归一化精度误差与液晶层厚度之间的关系。 $h$ 越大,相位干扰产生的回程区就越大,从而使光束的远场能量分散,影响光束偏转效率,降低指向精度。

### 2.2.2 电极占空比

电极占空比与相位凹陷的大小密切相关。离散电极电压控制液晶分子偏转排列时,若电极间隙太大,会导致理想状态倾斜角与实际倾斜角存在差异,其相位会变成凹形,形成相位凹陷。电极占空比的数学公式表示为:

$$\gamma = \frac{a}{d}. \quad (6)$$

其中:  $a$  表示电极大小,  $d$  表示阵元宽度。公式(7)为相位分布数学表达式:

$$\phi'(x) = \int_{-\infty}^{\infty} [g(x)\varphi(x)]k(x)dx, \quad (7)$$

$$g(x) = \begin{cases} 1 & \text{mod}(x, d) < a \\ 0 & \text{others} \end{cases}, \quad (8)$$

其中,  $g(x)$  与  $\text{mod}(x, d)$  分别表示分段函数与求余函数。

图4表示占空比为80%时的相位延迟分布。理想的相位面为一条斜线,柱状台阶式的相位面代表离散相控阵元的相位调制,中间的空隙表示电极占空比。通过获取的相位延迟分布数据可以由公式(1)计算得到出射角度,再代入公式(2)得到不同电极占空比对归一化精度误差的影响,如图5所示。

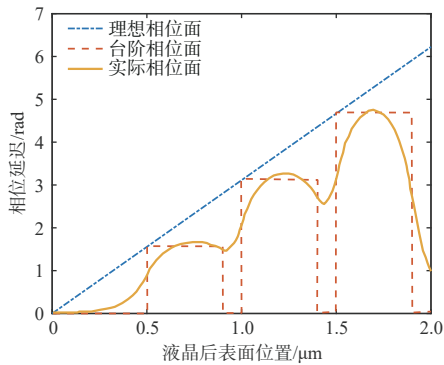


图4 电极占空比相位延迟分布示意图

Fig.4 Schematic diagram of electrode duty cycle phase delay distribution

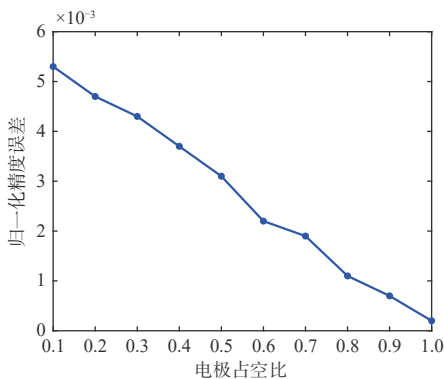


图5 电极占空比对归一化精度误差的影响

Fig.5 Influence of electrode duty ratio on normalization accuracy error

从图5可以看出,当电极占空比变大时,相邻两个电极间隙减小。根据前文介绍的相位凹陷形成原理可知,电极间隙越小,所产生的相位凹陷就越小,归一化精度误差也会随之减小。

### 2.2.3 电极制造误差

液晶盒制作过程中,液晶填充于两层玻璃基板之间的空隙。由于制作工艺难免导致液晶盒表面不平整,其产生的相位误差通常用正弦幅度表示:

$$\phi_{\text{error}}(x) = 2\pi A \lambda \cos \left[ 2\pi \left( \frac{x - \bar{x}}{D} \right) - \frac{1}{2} \right], \quad (9)$$

式中:  $A$  为液晶盒表面起伏度,  $x$  为位置信息,  $\bar{x}$  为起伏度均值,  $D$  为液晶移相器的直径。计算得到的相位误差带入到式(1)与式(2),即可得到不同  $A$  值对归一化精度误差  $\epsilon_{\text{norm}}$  的影响,如图6所示。

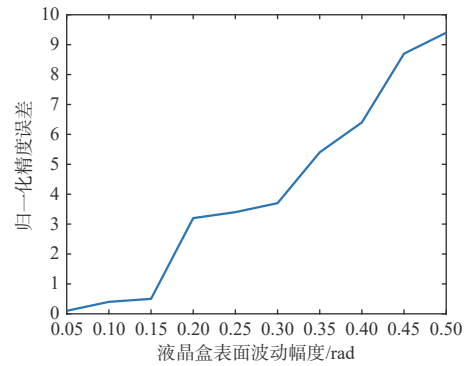


图6 波动幅度值  $A$  对归一化精度误差的影响

Fig.6 Influence of fluctuation amplitude value  $A$  on normalization accuracy error

由图6可知,  $A$  值越小,液晶盒面平整度越高,电极制造误差对归一化精度误差的影响越小。但是由于液晶相控阵制造工艺的限制,  $A$  值只能达到约  $\lambda/20$ 。

### 2.2.4 电压量化

通常,我们通过液晶电压-相移特性曲线获得光束偏转角度的理想电压。由于驱动芯片的量化位数有限,波控器向每个电极加载控制电压时,因电压个数有限,所以电极上实际加载的电压往往达不到理想电压,导致相位延迟分布出现误差。图7为周期电极数  $M=16$ 、量化位数为4位时的理想台阶相位与存在量化误差的台阶相位延迟分布图。

通过图7可以明显看出,电压量化后,理想电

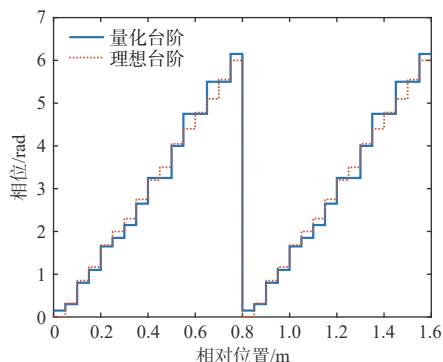


图7 理想台阶相位与存在量化误差的台阶相位分布  
Fig.7 Ideal step phase and step phase distribution with quantization error

压与实际电压的偏差导致不同台阶相位出现降低和抬高的情况,产生电压量化误差。通过仿真,我们获得了不同电压量化位数下的相位延迟分布数据,带入到式(1)与式(2)中,得到电压量化位数对归一化精度误差的影响曲线,如图8所示。

由图8可以看出,归一化精度误差随着电压量化的位数上升而降低,但后期变化不明显。并且量化位数太高会影响系统性能,所以本研究的电压量化位数取8位。

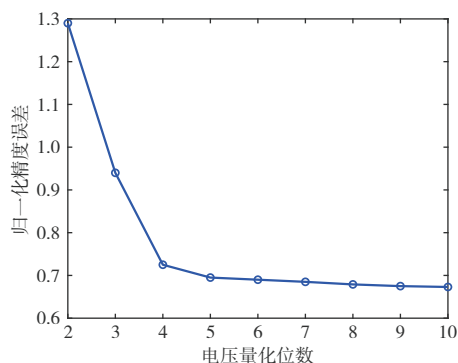


图8 电压量化位数产生的精度误差  
Fig.8 Accuracy error generated by voltage quantization digit

### 2.3 小结

合理的参数选择只能减少影响因素对光束

指向的影响,但无法完全消除误差。因为影响因素对光束指向的影响是一个综合过程,不仅仅是简单的误差叠加。因此,在选择参数值的同时,还需通过优化算法调整电极电压来消除器件制造工艺引起的相位畸变,从而减小干扰因素的影响。这个过程是为了在全面选取每个参数值的基础上,进一步优化系统以尽量减少干扰因素的影响。

## 3 基于多策略改进哈里斯鹰算法的光束指向精度优化

### 3.1 优化算法概述

由2.2.4节电压量化的分析可知,由于液晶相控阵的每个电极是离散的,当波控器向每个电极加载控制电压时,理想电压与实际电压的偏差导致不同台阶相位出现降低和抬高的情况,所以若对每个电极上的波控电压(一组电压代码)进行调整优化,使实际电压的相位台阶分布趋近于理想相位台阶分布,就可以减小光束偏转角度的归一化精度误差。

哈里斯鹰算法的优点之一是对目标函数形式没有特定要求。本研究以最终波束的归一化精度误差  $\epsilon_{\text{norm}}$  为优化目标,使其通过搜索迭代逐渐减小以获得最优解,最后得到的最优解为归一化精度误差最小的波控电压。

### 3.2 多策略改进哈里斯鹰算法

#### 3.2.1 哈里斯鹰算法原理

哈里斯鹰算法<sup>[16]</sup>是自然启发算法的一种,其通过数学公式来模拟哈里斯鹰捕猎时,会根据兔子的不同状态选择不同的捕猎策略。全局探索阶段和局部开发阶段为哈里斯鹰算法的两个重要组成阶段。

在全局探索阶段,哈里斯鹰处于观察状态,在监控搜索空间  $[lb, ub]$  内检测猎物踪迹,此时哈里斯鹰会采取两种策略,迭代时以概率  $q$  进行位置更新,其数学表达式如式(10)所示:

$$X_{t+1} = \begin{cases} X_{\text{rand}} - r_1 |X_{\text{rand},t} - 2r_2 X_t|, & q \geq 0.5 \\ (X_{\text{rabbit},t} - X_{m,t}) - r_3 (lb + r_4 (ub - lb)), & q < 0.5 \end{cases}, \quad (10)$$

式中:  $X_{t+1}$  表示哈里斯鹰在  $t+1$  次迭代时的位置信息,  $X_{\text{rabbit},t}$  表示第  $t$  次迭代时的猎物位置信息。本研究规定的搜索区间为  $(0, 5)$ , 表示  $0 \sim$

$5$  V 电压代码范围,  $q$  和  $r_1, r_2, r_3, r_4$  为搜索区间内的随机数字,目的是模拟哈里斯鹰初始位置的不确定性。  $X_{m,t}$  为第  $t$  次迭代时哈里斯鹰的平均位

置,数学公式表达如式(11)所示:

$$X_{m,t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{i,t} \quad (11)$$

处于过渡阶段时,兔子的能量被模拟为:

$$E = 2E_0 \left( 5 - \frac{t}{T} \right), \quad (12)$$

式中: $E$ 为猎物逃跑时的能量; $E_0$ 为初始状态时的猎物能量,公式表达为 $E_0 = 2\text{rand}$ ,rand为在搜索区间内的随机数; $T$ 为总迭代次数; $t$ 为当前迭代次数。

在过渡阶段后,算法会根据兔子的能量阈值或逃跑行为模拟哈里斯鹰的4种捕猎追逐策略,这一阶段就是算法的局部开采阶段。4种攻击行为如下:

$$X_{t+1} = \begin{cases} Y: X_{\text{rabbit},t} - E | JX_{\text{rabbit},t} - X_t |, & \text{if } F(Y) < F(X_t) \\ Z: Y + S \times \text{LF}(D), & \text{if } F(Z) < F(X_t) \end{cases}, \quad (16)$$

其中: $D$ 表示问题的维度, $S$ 为 $D$ 维随机行向量。

(4)当兔子能量处于搜索阈值以下时,哈里

$$X_{t+1} = \begin{cases} Y: X_{\text{rabbit},t} - E | JX_{\text{rabbit},t} - X_{m,t} |, & \text{if } F(Y) < F(X_t) \\ Z: Y + S \times \text{LF}(D), & \text{if } F(Z) < F(X_t) \end{cases}. \quad (17)$$

哈里斯鹰算法搜索处理步骤可能经常出现局部最优、收敛精度低等缺陷,大量学者针对其缺陷进行了改进<sup>[17-20]</sup>。本文设计了兼顾全局与局部并优策略的哈里斯鹰算法(G&L-HHO),对传统哈里斯算法进行改进。

### 3.2.2 全局寻优增强

在全局搜索阶段,通过引入柯西(Cauchy)分布函数使哈里斯鹰位置数据发生变异,这样做的好处是可以提高哈里斯鹰算法的全局搜索能力。标准柯西分布函数如式(18)所示:

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{x^2 + 1} \right). \quad (18)$$

选用Cauchy函数进行变异的好处是其峰值相对较小,在搜索全局最优解时,开采局部区间较少。在局部搜索阶段,传统哈里斯鹰算法的局部极值点约束力太强,容易陷入局部寻优。Cauchy函数的峰值下降平缓,可以有效解决该问题。 $X_{\text{best}}$ 为当前全局最优解,由柯西变异函数模型推导得出,再采用公式(19)对最优解进行更新:

(1)采取软围攻时,其更新位置的方程如式(13)、(14)所示:

$$X_{t+1} = \Delta X_t - E | JX_{\text{rabbit},t} - X_t |, \quad (13)$$

$$\Delta X_t = X_{\text{rabbit},t} - X_t, \quad (14)$$

其中: $X_t$ 表示进行迭代时,兔子与哈里斯鹰之间的距离差; $J = 2(5 - r_5)$ 表示兔子在逃跑的过程中发生的随机跳跃, $r_5$ 是(0,5)之间的随机数字。

(2)采取硬围攻时,其更新位置的方程如式(15)所示:

$$X_{t+1} = X_{\text{rabbit},t} - E | \Delta X_t |. \quad (15)$$

(3)采取累速俯冲式软围攻时,使用levy函数LF集成在HHO算法中模拟兔子逃跑路线与跳跃节奏,更新位置公式如式(16)所示:

斯鹰采取累速俯冲式硬围攻捕猎兔子,位置更新如式(17)所示:

$$X'_{\text{best}} = X_{\text{best}} + X_{\text{best}} \times \text{Cauchy}(0, 5). \quad (19)$$

### 3.2.3 局部寻优增强

哈里斯鹰算法进行局部搜索或全局搜索往往受惯性加权因子影响,若对当前猎物位置(最优解)精度不满意,可以通过惯性加权因子对猎物位置邻域进行更新,以获取更精准的最优解,提高算法的局部开采能力。

在局部搜索阶段,本研究采用自适应余弦加权因子更新局部位置,在哈里斯鹰算法中表现为当哈里斯鹰针对兔子逃跑行为采取4种捕猎策略时,余弦加权因子会使兔子动态地更新位置信息,从而提高算法局部寻优能力。余弦加权公式如(20)所示:

$$\omega = -\cos\left(\frac{t}{T}\right) + 1. \quad (20)$$

式(21)为兔子位置更新公式:

$$X'_{\text{rabbit}} = \omega \times X_{\text{rabbit}}, \quad (21)$$

其中: $T$ 为总迭代次数;实时迭代次数用 $t$ 表示; $\omega$ 为前文提到的余弦自适应权重因子,对 $\omega$ 进行融合,可以有效优化哈里斯鹰的局部开采能力。

### 3.3 算法流程

本研究旨在提升液晶相控阵的光束指向精度,采用优化算法降低光束指向归一化精度误差  $\epsilon_{\text{norm}}$ 。在自然启发算法中,哈里斯鹰模拟的是光束偏转角度误差,用适应度函数表示。兔子模拟的是最优液晶相控阵的波控电压,  $X'_{\text{best}}$  与  $X_{\text{best}}$  分别代表个体历史的最优值与全局最优值。算法的每次迭代都会对哈里斯鹰的位置进行更新,并根据兔子的能量选择合适的捕猎策略,使其朝着归一化精度误差减小的方向迭代,算法流程图如图 9 所示。

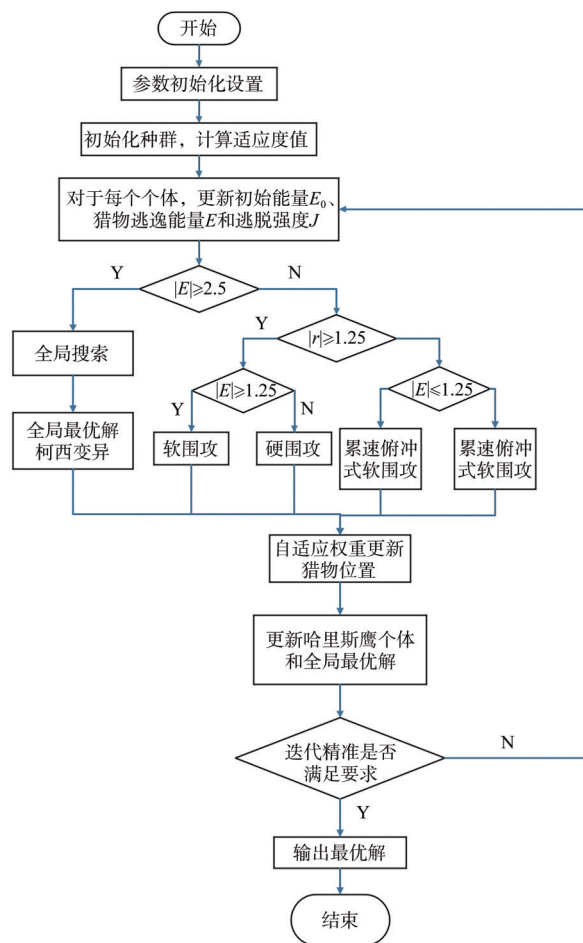


图 9 算法流程图

Fig.9 Algorithm flow chart

### 3.4 仿真结果分析

本研究选取合适的器件参数,采用 G&L-HHO 优化算法校正液晶相控阵的驱动电压,降低光束偏转误差,优化光束的指向精度,进行仿真实验。仿真参数如表 1 所示。

表 1 G&L-HHO 算法的仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of G&L-HHO algorithm

参数	参数值
激光波长	$1.064 \times 10^{-6} \text{ m}$
电极中心间距	$9.2 \times 10^{-6} \text{ m}$
占空比	100%
电极总数	64
电压量化位数	8

图 10 为 G&L-HHO 优化算法的迭代曲线。从图 10 可以看出,在迭代 11 次后,精度误差收敛到全局最优值。与传统粒子群算法相比,本算法收敛速度更快。图 11 为远场光强分布图。

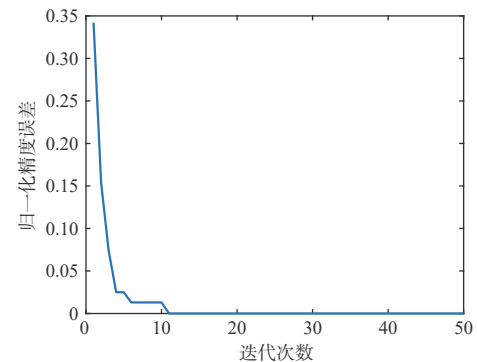


图 10 G&L-HHO 优化算法的迭代曲线

Fig.10 Iterative curve of G&L-HHO optimization algorithm

如图 11(b)所示,加载理想电压代码时,由于电压量化导致最终的波束偏转角度与理想角度有一定差距,其归一化精度误差为  $\epsilon_{\text{norm}}=0.6399$ 。经过算法优化后,得到的修正角度与理想角度的归一化精度误差降至  $\epsilon_{\text{norm}}=0.00021$ ,极大地降低了精度误差,改善了波束指向精度,验证了算法在此角度下的有效性。

图 12 为波阵面相位分布对比图,通过优化前后的相位分布求得出射光的偏转角度。本研究在最大偏转角度内挑选一组偏转角度进行仿真实验,获得的实验结果如图 13 所示。

从图 13 中可以看出,前文提到的若干影响因素对液晶相控阵的光束指向精度有较大影响,可以明显看出实际偏转角度与理想偏转角度之间存在较大误差。其中,在  $\theta_{\text{sport}} = 5.888 \times 10^{-4}$ 、归一化角度为 0.5194 rad 时,归一化精度误差达到了  $\epsilon_{\text{norm}}=0.8594$ ,严重影响了液晶相控阵光束偏

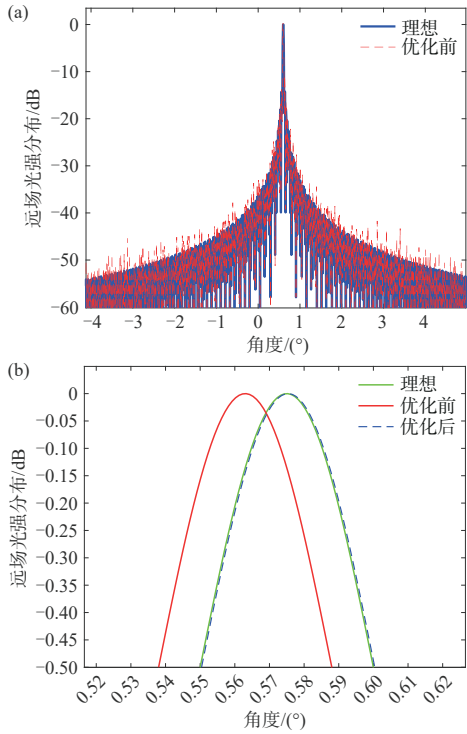


图 11 算法优化前后的远场光强分布对比图。(a)原图；(b)局部放大图。

Fig.11 Comparison of far field light intensity distribution before and after algorithm optimization. (a) Original image; (b) Partial enlarged view.

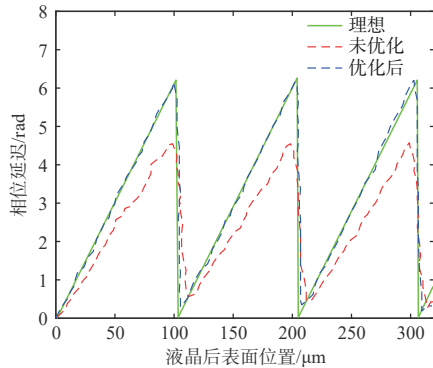


图 12 算法优化前后的波阵面相位分布对比图

Fig.12 Comparison of wavefront phase distribution before and after algorithm optimization

转精度。通过修正后的偏转角度曲线可以看出,对离散电极的电压代码寻优后,实际偏转角度与理想偏转角度几乎一致,表明本研究的优化算法是有效的。

从图 14 可以看出,优化前后的归一化精度误差减小非常明显。图 14(a)中归一化精度误差为  $10^0$  数量级,并且波动幅值很大;在图 14(b)中,在

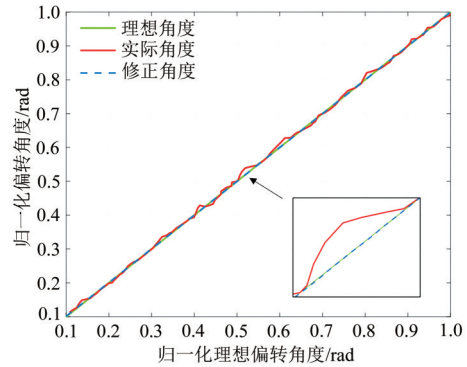


图 13 偏转角度分布示意图

Fig.13 Schematic diagram of deflection angle distribution

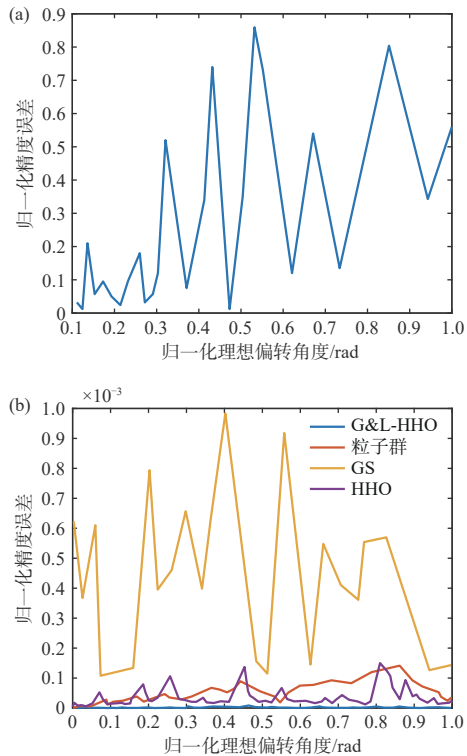


图 14 优化前后的归一化精度误差。(a)优化前;(b)优化后。  
Fig.14 Normalized accuracy error before and after optimization. (a) Before optimization; (b) After optimization.

选取相同仿真参数的情况下,使用光束偏转精度优化算法中常见的GS算法、粒子群算法以及传统哈里斯鹰算法与本文改进后的算法进行对比。可以明显看出,本文提出的G&L-HHO优化算法将归一化精度误差缩小到了  $10^{-4}$  数量级,波动幅值也显著减小。仿真结果表明,G&L-HHO算法有效地降低了光束偏转角度误差,并使液晶相控阵的指向精度显著提升。

## 4 结 论

在非机械光束偏转技术中,液晶相控阵难免受制作工艺或元件自身物理特性的影响,对光束指向精度产生误差。本研究对液晶相控阵调制机理和影响因素进行分析,搭建了液晶相控阵光束偏转模型。本文设计了兼顾全局与局部并优策略的哈里斯鹰算法(G&L-HHO),引入柯西变异执行全局搜索、自适应余弦加权因子等,多方

面增强哈里斯鹰算法的寻优性能。仿真实验结果表明,本文所提出的G&L-HHO的归一化精度误差由 $10^0$ 数量级优化为 $10^{-4}$ 数量级,归一化精度误差波动幅值大幅降低,并具有收敛精度高、收敛速度快、鲁棒性强等优点。在实际应用中,由于实验环境因素的复杂性与多变性,同时液晶盒固有的电极占空比等参数难以达到理想化的100%,必然会导致误差增大。但通过仿真对比实验,其优化性能依然强于大部分常用优化算法。

## 参 考 文 献:

- [1] 王春阳,李兰婷,史红伟,等. 基于液晶相控阵的光束偏转控制方法研究[J]. 液晶与显示,2018,33(10):857-863.  
WANG C Y, LI L T, SHI H W, *et al.* Beam deflection control method based on liquid crystal phased array [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(10): 857-863. (in Chinese)
- [2] 牛启凤,王春阳,张广平,等. 液晶相控阵指向矢分布求解及其光束偏转[J]. 光学精密工程,2018,26(12):2894-2901.  
NIU Q F, WANG C Y, ZHANG G P, *et al.* Solution of liquid crystal phased array director and its beam deflection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(12): 2894-2901. (in Chinese)
- [3] WANG X R, WU L, XIONG C D, *et al.* Agile laser beam deflection with high steering precision and angular resolution using liquid crystal optical phased array [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2018, 17(1): 26-28.
- [4] 牛启凤. 液晶相控阵光束偏转关键技术研究[D]. 长春:长春理工大学,2020.  
NIU Q F. Research on technology of liquid crystal phased array beam deflection [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [5] HE Z Q, YIN K, WU S T. Miniature planar telescopes for efficient, wide-angle, high-precision beam steering [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 134.
- [6] LI Y L, LI N N, WANG D, *et al.* Tunable liquid crystal grating based holographic 3D display system with wide viewing angle and large size [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 188.
- [7] 肖锋. 液晶光学相控阵关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2018.  
XIAO F. Research on key technologies of the liquid crystal optical phased array [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [8] 孔令讲,易伟,杨建宇,等. 激光雷达液晶相控阵组件扫描精度分析[J]. 中国激光,2009,36(5):1080-1085.  
KONG L J, YI W, YANG J Y, *et al.* Research on scanning accuracy of liquid crystal phased array component of laser radar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(5): 1080-1085. (in Chinese)
- [9] 黄志伟,王春阳,彭丽华,等. 基于蝙蝠算法的液晶光学相控阵波束优化[J]. 激光与光电子学进展,2018,55(8):082303.  
HUANG Z W, WANG C Y, PENG L H, *et al.* Beam optimization of liquid crystal optical phased array based on bat algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 082303. (in Chinese)
- [10] 王承逸. 基于液晶光学相控阵的高精度光束指向控制技术[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2021.  
WANG C M. High-precision beam pointing control technology based on liquid crystal optical phased array [D]. University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese)
- [11] LI M, CAI G, XU H, *et al.* Experimental research on beam steering characteristics of liquid crystal optical phased array [C]//*Proceedings of SPIE 10244, International Conference on Optoelectronics and Microelectronics Technology*

- and Application*. Shanghai, China: SPIE, 2016: 102441S.
- [12] WANG X R, XU J H, HUANG Z Q, *et al.* Theoretical model and experimental verification on the PID tracking method using liquid crystal optical phased array [C]//*Proceedings of SPIE 10096, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXIX*. San Francisco: SPIE, 2017: 1009618.
- [13] Aerospace and Defense Companies. Tip-tilt-focus optical phased array and high power adaptive optic: US, 9632345 [P]. 2017.
- [14] WANG C M, WANG Q D, MU Q Q, *et al.* High-precision beam array scanning system based on liquid crystal optical phased array and its zero-order leakage elimination [J]. *Optics Communications*, 2022, 506: 127610.
- [15] WANG C M, CHEN W, ZHAO Z W, *et al.* Quantitative error analysis for non-mechanical phase-controlled beam steering based on symmetrical radial sub-aperture coherence algorithm [J]. *Liquid Crystals*, 2021, 48(3): 361-367.
- [16] HEIDARI A A, MIRJALILI S, FARIS H, *et al.* Harris hawks optimization: algorithm and applications [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2019, 97: 849-872.
- [17] 许鹏. 哈里斯鹰优化算法的改进及其应用研究[D]. 西安:西安理工大学,2021.  
XU P. Improvement and application of Harris hawks optimization algorithm [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [18] 赵凯. 樽海鞘与哈里斯鹰优化算法的改进及应用[D]. 郑州:郑州轻工业大学,2021.  
ZHAO K. Improvement and application of Salp swarm algorithm and Harris hawks optimization algorithm [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2021. (in Chinese)
- [19] 范陈程. 增强型哈里斯鹰优化算法及应用研究[D]. 南宁:广西民族大学,2021.  
FAN C C. Enhanced Harris hawks optimizer and its applications [D]. Nanning: Guangxi University for Nationalities, 2021. (in Chinese)
- [20] 汤安迪,韩统,徐登武,等. 混沌精英哈里斯鹰优化算法[J]. 计算机应用,2021,41(8):2265-2272.  
TANG A D, HAN T, XU D W, *et al.* Chaotic elite Harris hawks optimization algorithm [J]. *Journal of Computer Applications*, 2021, 41(8): 2265-2272. (in Chinese)

#### 作者简介:



王 哲,男,硕士研究生,2020年于长春大学获得学士学位,主要从事机器视觉与优化算法方面的研究。E-mail: 351920429@qq.com



胡 奇,男,博士,副教授,2017年于长春理工大学获得博士学位,主要从事智能信息处理、深度学习理论与应用、固态激光雷达等方面的研究。E-mail: huqi@cust.edu.cn