

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209100

# 机载多电磁矢量传感器的飞行器姿态优化估计

党帅军<sup>1</sup> 陈广东<sup>2</sup> 廖俊杰<sup>1</sup> 朱世杰<sup>1</sup>

(1.南京航空航天大学电子信息工程学院/集成电路学院 南京 211000; 2.南京航空航天大学无人驾驶飞机研究院 南京 210000)

**摘要:** 实现对飞行器飞行姿态的快速精准估测是成功执行任务的重要保障。为提高飞行器飞行姿态估测的精准性和快速性,考虑到多重信号分类(MUSIC)算法在谱峰搜索的时候计算量大且速度慢的特点,提出了在谱峰搜索中应用改进的粒子群算法。首先依靠飞行器机身上的各电磁矢量传感器的姿态位置与来自地面基站上所传送的信号信息之间的变化规律,形成 MUSIC 算法中所需要的导向矢量,建立由电磁矢量传感器组成的信号接收阵列的电磁波信号数学模型表达式,求出协方差矩阵,将矩阵的特征值进行分解得到噪声子空间,构造出姿态空间谱函数来完成信号空间谱的建立和谐峰搜索,从而得到表征姿态的唯一谱峰。最后通过仿真实验验证表明,在谱峰搜索应用改进粒子群算法能够有效的提高飞行姿态的估测精度和搜索速度。

**关键词:** 电磁矢量传感器;粒子群算法;姿态;music 算法;导向矢量

中图分类号: TN911;V249 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.99

## Aircraft attitude optimization estimation based on airborne multiple electromagnetic vector sensors

Dang Shuaijun<sup>1</sup> Chen Guangdong<sup>2</sup> Liao Junjie<sup>1</sup> Zhu Shijie<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Information Engineering/School of Integrated Circuits, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211000, China;

2. Unmanned Aircraft Research Institute, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** Achieving fast and accurate estimation of vehicle attitude is an important guarantee for successful mission execution. In order to improve the accuracy and speed of attitude estimation, an improved particle swarm algorithm is proposed to be applied in the spectral peak search, considering that the multiple signal classification algorithm (MUSIC) algorithm is computationally intensive and slow in the spectral peak search. Firstly, the variation pattern between the attitude position of each electromagnetic vector sensor on the aircraft fuselage and the signal information transmitted from the ground base station is relied upon to form the steering vector required in the MUSIC algorithm, to establish the mathematical model expression of the electromagnetic wave signal of the signal receiving array composed of electromagnetic vector sensors, to find the covariance matrix, to decompose the eigenvalues of the matrix to obtain the noise subspace, and to construct the The attitude space spectral function is constructed to complete the establishment of the signal space spectrum and the search of the spectral peak, so as to obtain the unique spectral peak characterizing the attitude. Finally, the simulation shows that the improved particle swarm algorithm can effectively improve the estimation accuracy and search speed of the flight attitude.

**Keywords:** electromagnetic vector sensor;particle swarm algorithm;attitude;MUSIC algorithm;steering vector

## 0 引言

现存的大多数飞行器其姿态都是依靠惯性传感器三轴陀螺仪、加速度计和磁力计等惯导系统测量<sup>[1-2]</sup>得到。惯导系统其自身固定的漂移率也会影响对飞行姿态的测量,并且惯导系统是通过积分来实现对导航信息的解算,这就

会导致随着飞行时间越长,定位误差越大,测量精度也会越来越差。由于大加速度和磁场干扰等因素的存在,使得采用惯导系统的飞行器某些功能受到了限制<sup>[3]</sup>。因此,近年来研究人员将基于极化电磁波三维结构的电磁矢量传感器应用到了飞行器测姿上,通过多点接收,三角计算来测算姿态信息<sup>[4-5]</sup>。电磁波信源的空间位置可以由波达方向确定,

即常说的方位角和俯仰角。电磁波其自身的固有属性极化状态——极化幅度角和相位差角也就决定了它被接收和测量。在极化域中携带极化信息的电磁波信号可以被电磁矢量传感器接收,因此电磁波则成为了雷达信号与地面通讯系统之间存储数据的主要载体<sup>[6]</sup>,使其可以接收电磁波信号。当携有极化信息的电磁波被电磁矢量传感器接收后,通过利用空间谱 music 估计算法解算出空天飞行器的姿态参数便可以实现,进而完成了对飞行姿势的测定。而国外学者 Maguire 等<sup>[7]</sup>则提供了一个能够降低测姿过程中对大加速度的依赖的方法,即通过使用频率较低的无线电信号及其本身的极化信息,来测定空天飞行器的波达方向。国内的科研工作者通过建立一种由电磁矢量传感器阵列形成的导向矢量模型,然后再通过空间谱 music 估计算法进行谱峰搜索,进而完成了对飞行器姿态的计算<sup>[8-9]</sup>。传统 music 估计算法在空间谱遍历搜索的时候需要过多的采样数,这也导致产生了很大的计算量,而这也是造成运算速度缓慢的重要原因。目前有研究学者将 music 算法与遗传算法结合,应用于空间谱遍历搜索当中,飞行姿态的估测速度和精度均得到了提升。在保证算法稳定性的要求下,为了使飞行器姿态估测的速度和测量精度能够得到更有效的提高。本篇文章提出在谱峰搜索中应用改进的粒子群算法和等步长搜索算法。该方法将改进的粒子群算法与等步长搜索算法智能结合,通过对参数的设定,利用等步长搜索算法的搜索精准性,改进粒子群算法的快速性、有效性和鲁棒性等优点<sup>[10]</sup>,充分发挥算法的优势。在实现对飞行器的飞行姿态正确估测的同时,有效地提高了姿态估测的速度和精度。

## 1 极化电磁矢量传感器阵列接收模型

矢量传感器阵列可以测得空间中电磁波信号的传播方向和波达方向,空间中电磁波的传播方向也可以由传统的标量传感器阵列测得,但传统的标量传感器阵列无法测量信号的波达方向。本文就是基于电磁矢量传感器阵列接收电磁波信息从而实现对飞行姿态的测量,在空间域中,电磁波信号具有6个分量,它的6个分量包含3个与电场相关的分量,3个与磁场相关的分量,电磁矢量传感器能够测得这些分量。在大地坐标系下,极化电磁波的空间到达位置用波达方向表示,电磁波信号在空间中的传播方向沿 $-h$ ,如图1(a)所示。 $\varphi$ 表示的是方位角( $-\pi \leq \varphi \leq \pi$ ); $\theta$ 表示的俯仰角( $-\pi/2 < \theta \leq \pi/2$ )。电磁波的波达矢量 $h$ ,结构矢量 $u, v$ 相互正交,其中电磁波的结构向量与波达方向之间的关系:

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} \cos\varphi \cos\theta \\ \sin\varphi \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} -\sin\varphi \\ \cos\varphi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} -\cos\varphi \sin\theta \\ -\sin\varphi \sin\theta \\ \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

电磁波相互正交的结构向量可以作为估计飞行器飞行姿态的参照标准,以它的相互正交的3个结构向量可以作出一个三维直角坐标系。电磁波在传播的时候会形成如图1(b)的极化椭圆,极化椭圆由极化椭圆率 $\eta$ 和极化倾角 $\gamma$ 来表征( $\eta \in [-\pi/4, \pi/4]$ ,  $\gamma \in [-\pi/2, \pi/2]$ ),矢量 $u, v$ 是极化椭圆的长短轴,以波达矢量 $h$ 和矢量 $u, v$ 建立一个能够表征出来电磁波的极化信息和波达信息的坐标系,这样的坐标系就是我们常说的波结构坐标系。当实际估测姿态角的时候,就是以波结构坐标系作为参照标准进行姿态估测的。

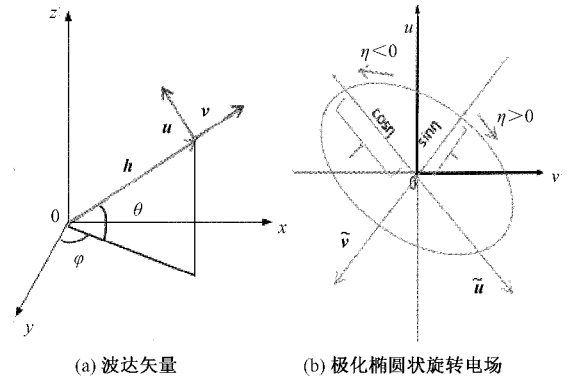


图1 波结构坐标系

由以上参数,便可以得到独立全电磁矢量传感器的导向矢量为 $\mathbf{g}(\varphi, \theta)\xi(\gamma, \eta)$ ,其中:

$$\mathbf{g}(\varphi, \theta) = \begin{bmatrix} I_3 \\ h \times \end{bmatrix} \cdot [v, u] =$$

$$\begin{bmatrix} -\sin\varphi & -\cos\varphi \sin\theta \\ \cos\varphi & -\sin\varphi \sin\theta \\ 0 & \cos\theta \\ -\cos\varphi \sin\theta & \sin\varphi \\ -\sin\varphi \sin\theta & -\cos\varphi \\ \cos\theta & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\xi(\gamma, \eta) = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma \\ -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\eta \\ i \sin\eta \end{bmatrix} \quad (5)$$

导向矢量还可以进一步以矩阵乘积的形式表示出来:

$$\mathbf{g}(\varphi, \theta)\xi(\gamma, \eta) = \mathbf{k}(\theta, \varphi, \gamma)\mathbf{d}(\eta) \quad (6)$$

$$\mathbf{k}(\theta, \varphi, \gamma) = \begin{bmatrix} k_R(\theta, \varphi, \gamma) & 0 \\ 0 & k_R(\theta, \varphi, \gamma) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{k}_R = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$d(\eta) = [0 \quad \cos\eta \quad i \cdot \sin\eta \quad 0 \quad -i \cdot \sin\eta \quad \cos\eta]^T \quad (9)$$

其中,  $k_R(\theta, \varphi, \gamma)$  表示的是波结构坐标系与大地坐标系之间的旋转关系。

## 2 电磁矢量传感器阵列信号接收模型

一般来说,通常是将编号为  $1, 2, 3, \dots, L$  的电磁矢量传感器安装到飞行器上,组成一个信号接收阵列。首先假设飞行器的位置在大地坐标系下是  $[x_f, y_f, z_f]^T$ , 飞行器在飞行过程中使得姿态变换的是一个旋转矩阵  $b_R$ 。其次假设接收阵列中的 1 号电磁矢量传感器在机身坐标系下的安装位置是  $[x_{10}, y_{10}, z_{10}]^T$ , 姿态是  $b_{R10}$ , 它是保持不变的。由以上假设,可以得出飞行器载 1 号电磁矢量传感器在大地坐标系下的安装位置。

$$[x_i, y_i, z_i]^T = b_R \cdot [x_{10}, y_{10}, z_{10}]^T + [x_f, y_f, z_f]^T = [x'_i, y'_i, z'_i]^T + [x_f, y_f, z_f]^T \quad (10)$$

其中, 1 号接收单元的姿态  $b_{R10}$  是不会变化的,  $L$  号电磁矢量传感器姿态是由阵列接收单元的安装和飞行器的平台运动共同作用造成的。这样一来,便可以得到

$$b_{Rl} = b_R b_{R10} \quad (11)$$

$b_{Rl}$  表示的是旋转差异矩阵,它与电磁矢量传感器姿态的形成是一样的原因。三维空间旋转理论<sup>[11]</sup>表明了一个三维旋转矩阵可以单独由一个旋转矢量来表征,因此旋转差异矩阵  $b_{Rl}$  便可以由单独的一个旋转矢量表示:

$$\boldsymbol{\varphi}_l = [\varphi_{1l}, \varphi_{2l}, \varphi_{3l}]^T \quad (12)$$

$$b_{Rl} = \exp \left( \begin{bmatrix} 0 & -\varphi_{3l} & \varphi_{2l} \\ \varphi_{3l} & 0 & -\varphi_{1l} \\ -\varphi_{2l} & \varphi_{1l} & 0 \end{bmatrix} \right) \quad (13)$$

由式(13)同理可得:

$$b_R = \exp \left( \begin{bmatrix} 0 & -\varphi_3 & \varphi_2 \\ \varphi_3 & 0 & -\varphi_1 \\ -\varphi_2 & \varphi_1 & 0 \end{bmatrix} \right) \quad (14)$$

$$b_{R10} = \exp \left( \begin{bmatrix} 0 & -\varphi_{310} & \varphi_{210} \\ \varphi_{310} & 0 & -\varphi_{110} \\ -\varphi_{210} & \varphi_{110} & 0 \end{bmatrix} \right) \quad (15)$$

由式(12)同理可得:

$$\boldsymbol{\varphi} = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3]^T \quad (16)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_{10} = [\varphi_{110}, \varphi_{210}, \varphi_{310}]^T \quad (17)$$

由以上变换关系可知:机载 1/L 号电磁矢量传感器接收单元的导向矢量的表达式如下:

$$a_i(\varphi, \theta, \gamma, \eta) = C_i b_l g(\varphi, \theta) \boldsymbol{\xi}(\gamma, \eta) \psi_i(\varphi, \theta) \quad (18)$$

在上式当中:  $C_i$  表示选择矩阵;

$$b_l = \begin{bmatrix} b_{Rl} & 0 \\ 0 & b_{Rl} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$\psi_i(\varphi, \theta)$ : 表示的是大地坐标系下的接收单元与机身坐标系下对应的接收单元之间的相位误差/相位延迟,它的

计算表达式如下:

$$\psi_i(\varphi, \theta) = \exp \left\{ \left( -i \frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot M \right\} \quad (20)$$

$$M = (x_l - x_o) \cdot \sin\varphi \cos\theta + (y_l - y_o) \cdot \sin\varphi \sin\theta + (z_l - z_o) \cdot \cos\theta \quad (21)$$

式中:  $\lambda$  为光速;  $[x_1, y_1, z_1]^T$  为机载 1 号在大地坐标系下的安装位置;  $[x_o, y_o, z_o]^T$  为机载 1 号在机身坐标系下的安装位置;

综上所述:飞行器机载  $L$  个电磁矢量传感器接收信号阵列的导向矢量表达式为:

$$d(\varphi, \theta, \gamma, \eta) = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 b_1 \psi_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_2 b_2 \psi_2 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_L b_L \psi_L \end{bmatrix} \cdot (\mathbf{I}_L \otimes \mathbf{g}(\varphi, \theta) \boldsymbol{\xi}(\lambda, \eta)) \quad (22)$$

式中:  $C_{1,2,\dots,L}$  为每个电磁矢量传感器对应的选择矩阵;  $\mathbf{I}_L$  为元素全为 1 的  $L$  维向量;  $\psi_{1,2,\dots,L}$  为每一个接收单元所产生的相位误差/延迟;  $\otimes$  为 kronecker 积,当建立了接收信号阵列的导向矢量之后,从表达式中可以发现,除了飞行器的飞行姿态参数是未知参数以外,其他参数都可以通过测量或计算成为已知参数。

## 3 极化阵列平台姿态估计方法

### 3.1 经典 MUSIC 算法估计飞行器姿态

空间谱估计理论中最具开创性的标志性的经典算法之一就是多重信号分类(MUSIC)算法,在 music 算法没提出之前,通常是接收天线阵列进行数据采集,然后对由阵列信号求解出的协方差矩阵进行处理。经典 music 算法所形成的导向矢量是由协方差矩阵经过特征值分解之后得到的。由此得到两个相互正交的子空间,一个是信号子空间,一个是噪声子空间。空间谱函数的建立正是利用这两个子空间的正交性,然后就是在全域中遍历搜索,寻出谱峰值,飞行姿态参数即为谱峰处所对应的参数。通过以下的一些表达式来了解一下 music 算法的基本原理。

在利用经典 MUSIC 算法估测飞行器的姿态时,首先建立上述  $L$  个电磁矢量传感器组成的接收信号阵列在接收远场电磁波信号数学模型式(23),其次,求出接收信号阵列的协方差矩阵式(24),而后对协方差矩阵  $\mathbf{R}$  解算出的特征值进行分解,得到了一个信号子空间  $U_1$ ,一个噪声子空间  $U_2$ ,因此协方差也可以用式(25)表示,求出这些参数之后,便可以构造算法姿态空间谱的函数式(26),由电磁矢量传感器阵列信号接收模型推算出的导向矢量表达式可知,只有飞行姿态参数  $b_R$  是未知参数,由式(14)可知在空间谱

遍历搜索这3个姿态参数,出现的谱峰就是实时估计的飞行姿态,谱峰峰值就是对应的姿态参数。

$$S = \mathbf{d}(\varphi, \theta, \gamma, \eta)m(t) + e(t) \quad (23)$$

$$\mathbf{R} = \frac{\sum_{t=1}^T (S(t)S^H(t))}{T} \quad (24)$$

$$\mathbf{R} = U_1 \Delta U_2 \quad (25)$$

$$P_{\text{music}} = \frac{1}{\mathbf{d}^H(\varphi, \theta, \gamma, \eta)U_2 U_2^H \mathbf{d}(\varphi, \theta, \gamma, \eta)} \quad (26)$$

式中:  $\mathbf{d}(\varphi, \theta, \gamma, \eta)$  是导向矢量;  $m(t)$  是远场信源信号;  $e(t)$  是高斯加性白噪声。

### 3.2 改进粒子群算法估计飞行器姿态

在特定条件下,经典 music 算法具备高精度测向的能力,其算法估计精度及稳定性也很好,能够完成对飞行姿态的估测。但是, music 算法在以等步长遍历搜索算法进行三维谱峰搜索的时候,步长的大小影响着搜索的精度和计算速度,步长太大,计算速度快但无法保证姿态估测搜索精度;步长太小,保证了姿态估测搜索精度,但计算速度/搜索数会呈几何倍数增长,谱峰搜索时间会大大变长,从而影响对飞行姿态的实时估测。其次,尽管粒子群算法在全局搜索上的能力很有优势,可以很快确定全局最优点,但是局部搜索能力却是粒子群算法一个缺点,想要精确求解就需要很长时间。所以,可以通过有机结合智能算法的强局部搜索能力,使其算法的优势可以相互补充<sup>[12]</sup>。本篇就是利用了这一思想对算法进行改进创新,在搜索精度能够保证的条件下,运行速度得以提升。

在众多的随机搜索算法当中,粒子群算法就属于其中比较特殊的一个,因为粒子群的更新和最优点是通过随机优化的方法来实现的。粒子群算法并不是单从一个独立的个体开始搜索的,而是从一个问题相关解的集合进行开始的<sup>[13]</sup>。而等步长遍历搜索算法在一定范围内以一定步长进行搜索,既可以保证搜索精度,又可以保证搜索的稳定性。针对在谱峰搜索时应用等步长遍历搜索算法会影响精度、速度和遗传算法在精确寻最优能力弱等出现的问题,本篇文章提出一种将改进的粒子群优化算法应用到谱峰搜索中可以有效地解决这些问题,改进如下:

1) 结合粒子群算法与等步长遍历搜索算法的优势。在谱峰搜索前期,粒子群算法可以在保证计算速度的前提下,粒子群可以很快的聚集收敛到谱峰周围的邻域,然后在这个邻域内由等步长遍历搜索算法进行精确搜索,寻出精确谱峰。整个过程当中,前期利用粒子群算法能够以集合在某一域内快速搜索的优点,后期利用等步长遍历搜索算法在前期收敛到的邻域精确搜索。这样既减少了大量的无效计算,提高了搜索速度,又可以精确寻优,控制误差。

2) 将粒子群全域切分成若干个相邻的域,进行先分域搜索再全域收敛。粒子的位置是互不干扰,互不影响的,每个粒子都会保存最优解的记忆<sup>[14-15]</sup>,当切分的粒子群在相

邻的每个域中收敛到那个域中的最优解的时候,当下保存最优解的粒子会共享信息,从而向全域的最优解收敛。而全域最优解的整个收敛的过程是跟随着各分域的最优解进行的。因此,在全域最优解收敛的过程中始终是以当下最优解进行搜索更新。

3) 设置阈值,引入变异子。粒子群算法本质上也是处理全局优化问题的一种概率算法,所以当处理高维的问题的时候,收敛过早和性能差的问题就会凸显出来,因此全域最优值的收敛便不能被保障。所以,收敛速度情况的好坏可以由预设阈值来对粒子群的适应度进行判定,当粒子群大于设定的阈值的时候,适应度好的粒子将会保存下来,粒子群才会向全域最优解收敛,反之则远离,从而可以动态的调整粒子群开发搜索的能力和保证群体多样性。当出现过早收敛的粒子群的时候引入变异子,使过早收敛的粒子群不会在局部最优解的位置上停留,从而可以继续向全域最优解收敛。

## 4 仿 真

本篇文章的实验仿真中,在信号的选择上,选用的是带宽远远小于其中心频率的远场窄带信号,且为非线性非圆极化单一独立的电磁波信号。在测量飞行姿态的时候,将有高斯白噪声添加到电磁波信号当中,波达方向和极化参数  $(\varphi, \theta, \gamma, \eta)$  是已知的,根据波达方向  $(-\pi \leq \varphi \leq \pi, -\pi/2 < \theta \leq \pi/2)$ ,极化参数  $(\eta \in [-\pi/4, \pi/4], \gamma \in [-\pi/2, \pi/2])$  的定义域,将其设为  $(10^\circ, 45^\circ, 0^\circ, 30^\circ)$ ,信号信噪比设为 40 dB。信号接收单元的安装位置分别是以机身坐标系为参照下的  $(1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1)$  3 个坐标位置,安装姿态为  $(10^\circ, 0^\circ, 0^\circ), (0^\circ, 10^\circ, 0^\circ), (0^\circ, 0^\circ, 10^\circ)$ 。根据电磁矢量传感器阵列信号接收模型中坐标系的转换可知,飞行器在大地坐标系下的姿态为  $(30^\circ, -45^\circ, 10^\circ)$ 。将仿真所用到的 3 个电磁矢量传感器接收单元安装到测试飞行器上,使 3 个信号接收单元组成接收阵列,生成导向矢量,接收阵列的信号采样快拍数为 500。设置好初始状态后,接下来进行实验仿真。

### 4.1 经典 music 算法测量飞行姿态的仿真

设  $\varphi_3 = 10^\circ$ , 利用经典 music 算法以精度为  $0.1^\circ$  进行搜索姿态角  $\varphi_1, \varphi_2$ , 算法运行开始至结束总用时 33 s。通过图 2 仿真图可知, music 算法能够正确的估测飞行器的飞行姿态。

### 4.2 传统粒子群算法估测飞行姿态的仿真

利用传统的粒子群算法对飞行姿态的方位角和俯仰角进行搜索,算法相关参数设置如下:粒子群规模设为 50,迭代次数为 100,惯性权重为 0.6。已知  $\varphi_3 = 10^\circ$ , 搜索姿态方位角和俯仰角  $\varphi_1, \varphi_2$ , 程序运行时间 9 s。进行 100 次的仿真测试实验(图 3, 4)。由仿真结果和误差分析可知:飞行姿态角均能被有效估测,绝对误差稳定在  $0.4^\circ$  之内,  $\varphi_1, \varphi_2$  的 100 次实验的平均误差分别为  $0.08^\circ, 0.1^\circ$ 。

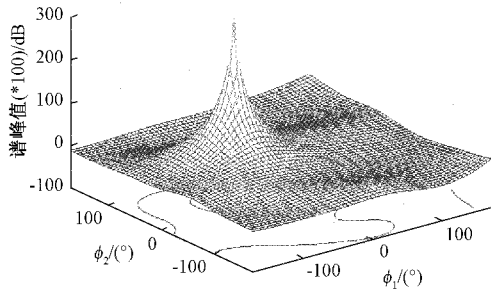


图 2  $\varphi_3 = 10^\circ$ : 姿态空间谱值与  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  的变化关系图

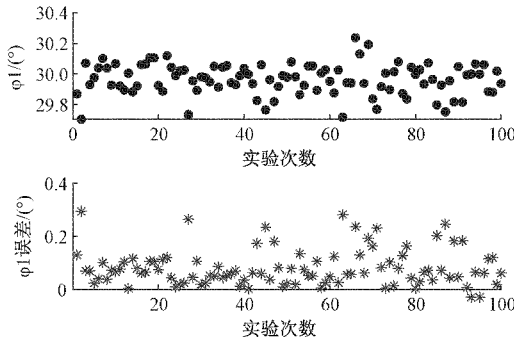


图 3  $\varphi_1$ : 100 次的仿真结果和误差分析图(粒子群算法)

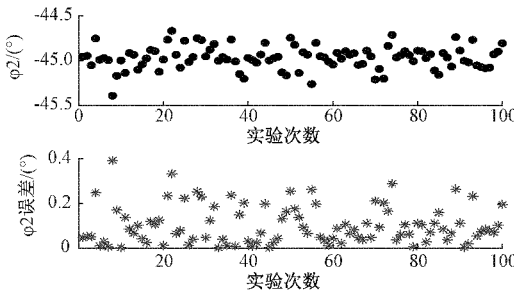


图 4  $\varphi_2$ : 100 次仿真结果和误差分析图(粒子群算法)

### 4.3 改进粒子群算法估测飞行姿态的仿真

利用改进的粒子群算法对飞行姿态的方位角和俯仰角进行搜索,算法相关参数设置如下:粒子群规模设为 50,迭代次数为 100,惯性权重为 0.6,引入变异子个数为 6,设置粒子飞行速度最高阈值  $V_{\max} = 5$ 。已知  $\varphi_3 = 10^\circ$ , 搜索姿态方位角和俯仰角  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ , 程序运行时间 8 s。进行 100 次的仿真测试实验(图 5、6)。由仿真结果和误差分析可知:飞行姿态角均能被有效估测,算法稳定性较好,且绝对误差稳定在  $0.3^\circ$  之内,  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  的 100 次实验的平均误差分别为  $0.07^\circ$ 、 $0.06^\circ$ 。

### 4.4 传统粒子群算法估测三维飞行姿态的仿真

将传统的粒子群算法对应用到三维飞行姿态谱峰搜索上,算法相关参数设置如下:粒子群规模设为 100,迭代次数为 100,惯性权重为 0.6。算法运行总用时 15 s。根据 100 次的实验仿真结果分析可得(图 7):由图 7 可知,在三维姿态搜索的过程中,姿态角均能被有效的估测出,绝对误

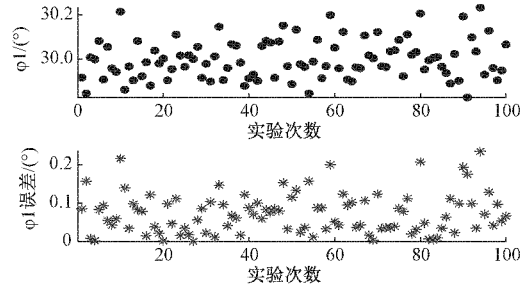


图 5  $\varphi_1$ : 100 次仿真结果和误差分析图(改进粒子群算法)

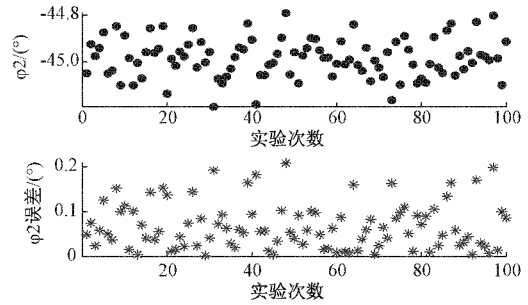


图 6  $\varphi_2$ : 100 次仿真结果和误差分析图(改进粒子群算法)

差稳定在  $1^\circ$  之内。 $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $\varphi_3$  100 次实验的平均误差分别为  $0.24^\circ$ 、 $0.29^\circ$ 、 $0.18^\circ$ 。

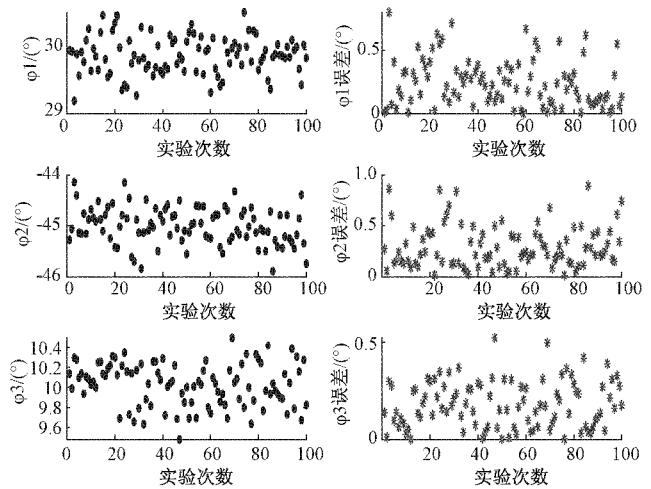


图 7 100 次三维姿态搜索仿真结果和误差分析图(粒子群算法)

### 4.5 改进粒子群算法估测三维飞行姿态的仿真

将改进的粒子群算法应用到三维飞行姿态谱峰搜索上,算法相关参数设置如下:粒子群规模设为 100,迭代次数为 100,惯性权重为 0.6,引入变异子个数为 10,设置粒子飞行速度最高阈值  $V_{\max} = 5$ 。算法运行总用时 17 s。根据 100 次的实验仿真结果分析可得(图 8):由下图可知,在三维姿态搜索的过程中,姿态角均能被有效的估测出,算法的稳定性很好,并且绝对误差稳定在  $0.4^\circ$  之内。 $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $\varphi_3$  100 次实验的平均误差分别为  $0.11^\circ$ 、 $0.09^\circ$ 、 $0.08^\circ$ 。

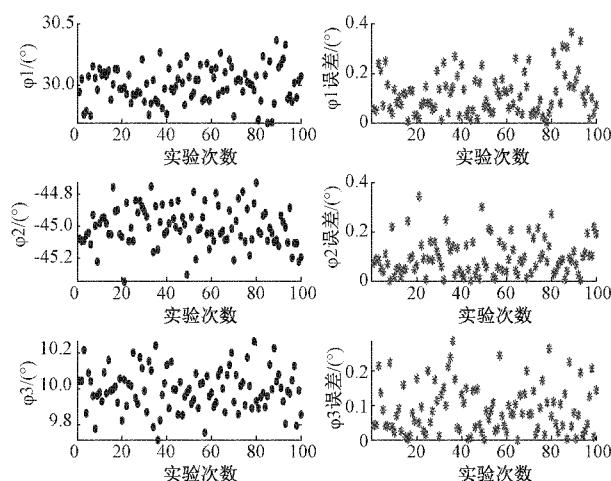


图8 100次三维姿态搜索仿真结果和误差分析图  
(改进粒子群算法)

#### 4.6 实验结论

将第四部分的实验仿真结果的实验数据汇总到表1中。通过对比分析:由表1可知,在100次二维姿态搜索的实验中,传统的粒子群算法和改进的粒子群算法搜索速度与估测精度相差无几,并且实验参数的绝对误差也是相差不多的,但相比较于等步长遍历搜索算法,两种粒子群算法的性能要更好,算法都能够更快的完成对飞行姿态的估测。改进的粒子群算法在三维姿态搜索的100次仿真实验中更能凸显出改进粒子群算法自身的优势。在三维姿态搜索当中,传统的粒子群算法所估测的姿态参数绝对误差要高于改进的粒子群算法,这说明了改进后的算法在谱峰搜索的时候精度更高,并且算法性能的稳定性和要好。

表1 算法搜索性能

100次实验	$\sigma_{\varphi_1}$	$\sigma_{\varphi_2}$	$\sigma_{\varphi_3}$	$\delta$	用时/s
等步长搜索算法 $\varphi_3=10^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$	—	$0^\circ$	33
等步长+粒子群算法 $\varphi_3=10^\circ$	$0.08^\circ$	$0.1^\circ$	—	$0.4^\circ$	9
等步长+改进粒子群算法 $\varphi_3=10^\circ$	$0.07^\circ$	$0.06^\circ$	—	$0.3^\circ$	8
等步长+粒子群算法 (三维搜索)	$0.24^\circ$	$0.29^\circ$	$0.18^\circ$	$1^\circ$	15
等步长+改进粒子群算法 (三维搜索)	$0.11^\circ$	$0.09^\circ$	$0.08^\circ$	$0.4^\circ$	17

$\sigma$ :平均误差;  $\delta$ :绝对误差

## 5 结 论

在估测天空飞行器的实时飞行姿态时,最关键的技术就是多个电磁矢量传感器之间的融合,传感器的误差补偿等<sup>[16]</sup>。电磁矢量传感器通过捕捉电磁波的极化矢量信息来形成导向矢量信息,由此可以独立完成对飞行姿态的估

测<sup>[17]</sup>。改进的粒子群算法中加入的变异子可以使算法的局部搜索性能变得更强,同时,也能够有效的抑制算法在局部最优解处循环<sup>[18]</sup>。将改进的粒子群算法应用于飞行器姿态搜索中,克服了等步长遍历搜索算法的大计算量导致姿态估测速度缓慢的缺点,大大提升了飞行姿态的搜索速度和精度。但是跟传统的粒子群算法相比,仅仅只是提高了估测精度,而搜索速度不相上下。在后续工作中将会进一步优化改进粒子群算法,在保证算法稳定性的前提下,使得飞行器飞行姿态估测的速度更快,精度更高。

#### 参考文献

- [1] 石喜玲,孙运强,李静.基于UKF信息融合的多旋翼飞行器姿态估计[J].测试技术学报,2020,34(4):277-281,288.
- [2] 陈旺才,陈骥,徐君,等.基于STM32的四旋翼飞行器姿态控制器设计与实现[J].电子测量技术,2020,43(19):165-168.
- [3] 陈广东,黄雨泽,王媛.基于电磁波三维结构向量的飞行器姿态估计[J].航空学报,2019,40(4):248-258.
- [4] 刘春,陈豪,戴雷,等.EWT算法在姿态解算中的应用[J].电子测量与仪器学报,2021,35(8):220-227.
- [5] 丛丽,李二翠,张立杨,等.基于INS辅助CLAMBDA与AFM的GPS/INS组合导航测姿方法[J].系统工程与电子技术,2015,37(4):882-887.
- [6] 肖洪坤.电磁矢量传感器阵列的几何代数模型及其参数估计[D].成都:电子科技大学,2015.
- [7] MAGUIRE S, ROBERTSON P. Low frequency radio polarization sensor with applications in attitude estimation[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(12): 7304-7311.
- [8] 孙红梅,陈广东,张弓.基于测控电磁波极化特征信息的飞行器姿态估计[J].雷达学报,2013,2(4):466-475.
- [9] 刘耀辉,陈广东,万思钰,等.基于三维波结构向量的飞行器姿态快速估计[J].电光与控制,2022,29(2):40-44.
- [10] 肖晓伟,肖迪,林锦国,等.多目标优化问题的研究概述[J].计算机应用研究,2011,28(3):805-808,827.
- [11] 李海伦,江浩,孙鹏伟.基于李代数表征的三维物体空间姿态检测[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(6):91-97,122.
- [12] 李芳,赵天洋.遗传算法理论及其应用进展探析[J].技术与市场,2016,23(1):87.
- [13] 李眩,吴晓兵,童百利.基于动态自适应变参的粒子群优化算法[J].四川轻化工大学学报(自然科学版),2021,34(5):41-47.
- [14] 李智.智能优化算法研究及应用展望[J].武汉理工大学学报,2016,35(4):1-9,131.
- [15] 吴毅强.粒子群算法和活动轮廓波模型的图像分割研究[J].国外电子测量技术,2020,39(7):47-51.

- [16] 刘晓琴. 基于 GRU 的四旋翼无人机飞行姿态估计[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021.
- [17] 陈广东, 王媛, 万思钰, 等. 基于全球卫星导航信号三维波结构的平台姿态估计方法[P]. CN111025361A, 2020-04-17.
- [18] MOHAMMAD J, ROGHIYEH H. Chaos genetic

algorithm instead genetic algorithm[J]. The International Arab Journal of Information Technology, 2015, 12(2): 1-6.

#### 作者简介

党帅军, 硕士研究生, 主要研究方向为测控雷达信号处理, 图像处理。

E-mail: 846748484@qq.com