

# 基于麻雀优化量子压缩感知的脉冲星定位定速方法

武达亮<sup>1</sup>, 刘劲<sup>1</sup>, 吴谨<sup>1</sup>, 宁晓琳<sup>2</sup>, 康志伟<sup>3</sup>

(1. 武汉科技大学 信息科学与工程学院, 武汉 430081; 2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;  
3. 湖南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410082)

**摘要:** 针对量子-压缩感知的X射线脉冲星定位定速方法(Quantum based CS, QCS)量子测量矩阵尺寸过大, 从而导致运行时间长的问题, 提出了一种基于麻雀优化压缩感知方法(Sparrow Search Algorithm optimized Quantum CS, SSA-QCS), 并将其应用于脉冲星定位定速。利用麻雀优化算法对QCS中构成量子测量母矩阵的各子矩阵进行优化选择。其中, 每只麻雀的位置对应一种子矩阵组合, 将QCS的定位定速误差联合起来作为麻雀算法的适应度函数值, 经过多次迭代得到行数少、性能优的量子测量矩阵。仿真结果表明: 与QCS相比, SSA-QCS定位定速精度高、运行时间短, 可实现高精度实时的X射线脉冲星定位定速联合估计。

**关键词:** SSA; CS; X射线脉冲星; 定位; 定速

**中图分类号:** V1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2023)02-0151-08

**DOI:** 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20230003

**引用格式:** 武达亮, 刘劲, 吴谨, 等. 基于麻雀优化量子压缩感知的脉冲星定位定速方法[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(2): 151-158.

**Reference format:** WU D L, LIU J, WU J, et al. Pulsar positioning and velocimetry method based on sparrow search algorithm-optimized quantum CS[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(2): 151-158.

## 引言

X射线脉冲星导航(X-ray Pulsar-based NAVigation, XPNAV)是众多天文导航方式中的一种, 是近年来的一个研究热点<sup>[1-5]</sup>。XPNAV利用X射线脉冲星实现航天器的定位、定速、定姿和定向等<sup>[6-7]</sup>。X射线脉冲星导航是通过使用X射线传感器来收集X射线脉冲星的微弱辐射信号, 累积脉冲星轮廓, 并估计脉冲到达时间(Time-Of-Arrival, TOA)<sup>[8-11]</sup>, 以此得到定位信息。因此, 实时高精度的脉冲TOA估计是XPNAV的关键技术之一。

众多学者对脉冲TOA估计进行了深入研究, 提出诸多TOA和脉冲星周期估计方法。其中, 基于压缩感知(Compressive Sensing, CS)的TOA估计<sup>[12-14]</sup>利用了CS处理稀疏(如脉冲星)信号的强大能力, 如基于哈达玛矩阵的CS<sup>[15]</sup>、基于观测矩的哈达玛矩阵CS<sup>[16]</sup>、基于两级字典的CS<sup>[17]</sup>、类哈达玛矩阵CS<sup>[18]</sup>、基于遗传算法优化的经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)-CS<sup>[19]</sup>。上述基于CS的TOA和周期估计方法都是仅能单独估计TOA或周期, 而实际中轮廓的畸变和相移是同时发生的。基于量子-CS定位定速方法

(Quantum based Compressive Sensing, QCS)可实现TOA和周期的联合估计<sup>[20]</sup>。QCS的核心技术是利用含多畸变多相移的X射线脉冲星轮廓字典, 通过多次量子观测构造随机量子测量矩阵。每次观测得到一个量子矩阵, 观测次数越多, QCS的估计性能也就越好。因此, 为获得较高的估计精度, QCS的量子测量矩阵不可避免地会很大。此外, 测量矩阵由不同的子矩阵组合而成, 因此不同的量子矩阵及其组合会对其性能带来影响, 也带来了巨大的计算量。如: 当测量母矩阵中有*i*个子矩阵时, 将有 $2^{i-1}$ 个组合, 也即 $2^{i-1}$ 个母矩阵。

本文提出了一种基于麻雀优化压缩感知(Sparrow Search Algorithm optimized Quantum CS, SSA-QCS)的快速脉冲星定位定速方法。SSA-QCS通过麻雀优化算法搜索QCS的量子测量母矩阵, 将适应度函数的值设置为QCS定位定速估计误差, 利用麻雀位置迭代更新来选择量子测量母矩阵中的子矩阵及其组合。迭代结束后即可得到小尺寸、高性能的优化测量矩阵。最后, 利用优选出的量子测量矩阵进行量子匹配估计, 最终实现脉冲星视线方向上的超快速定位定速联合估计。

收稿日期: 2023-01-08 修回日期: 2023-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61873196, 61772187, 61501336)

## 1 麻雀搜索算法

群智能仿生算法——麻雀搜索算法 (Sparrow Search Algorithm, SSA) 由薛建凯<sup>[21]</sup>于2020年提出, 模拟了麻雀种群的觅食、反捕食、分工合作、群体互动等行为, 利用麻雀的觅食过程对问题进行优化。

在该模型中, 麻雀个体位置代表问题的解 $X$ ,  $X$ 适应度 $f(X)$ 决定该位置的好坏。麻雀个体分成发现者、跟随者和预警者3种。发现者占总数的10%~20%, 发现者的职责是发现好的食物, 即广泛搜索解空间, 根据适应度进行位置优化。

发现者的位置更新为

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \times \exp\left(\frac{-i}{a \times I}\right), & R_2 < ST \\ X_{i,j}^t + Q \times L, & R_2 \geq ST \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $t$ 为迭代次数;  $X_{i,j}^t$ 为在第 $t$ 次迭代中第 $i$ 只麻雀的位置;  $j$ 表示解空间的维度;  $I$ 为迭代总数;  $a$ 为 $(0,1]$ 间的随机数;  $Q$ 为服从正态分布的随机数;  $L$ 为 $1 \times d$ 维单位行矢量。当个体警报值 $R_2$  ( $R_2 \in [0,1]$ )小于群体安全值 $ST$  ( $ST \in [0.5,1]$ )时, 表示周围是安全的, 发现者可正常搜索食物; 当 $R_2 \geq ST$ 时, 表示有危险, 所有麻雀立即飞向其它安全区域, 即麻雀们按服从正态分布的随机步长随机移动到当前位置附近, 其值收敛于最优位置。

种群中剩下的80%作为跟随者在发现者周围进行局部搜索, 跟随发现者发现食物。跟随者的位置更新为

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \times \exp\left(\frac{X_w^t - X_{i,j}^t}{t^2}\right), & i > n/2 \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_p^{t+1}| \times A^+ \times L, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $X_p^t$ 和 $X_w^t$ 分别表示第 $t$ 次迭代中的最优和最差位置;  $A$ 为元素为1或-1随机值的 $1 \times d$ 维行矢量,  $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$ 。当 $i$ 大于剩余麻雀数量 $n/2$ 时, 跟随者不追随发现者, 而是搜索新的位置。

SSA设置了预警机制, 在发现者中选取10%~20%作为预警者, 预警者的位置更新为

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_B^t + \beta \times |X_{i,j}^t - X_B^t|, & f_i > f_g \\ X_{i,j}^t + K \times \left(\frac{|X_{i,j}^t - X_w^t|}{f_i - f_w + \varepsilon}\right), & f_i = f_g \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $X_B^t$ 为累计最优位置; 步长参数 $\beta$ 服从正态分布; 控制系数 $K$ 为 $[-1,1]$ 区间的任意数;  $f_i$ 为个体适应度;  $f_w$ 和 $f_g$ 分别是最差和最优适应度;  $\varepsilon$ 为最小常量; 当 $f_i > f_g$ 时, 说明该个体处于边缘位置有一定的危险, 应集中到中心周围。处于边缘位置的个体按正态分布

步长随机移动到当前最优位置 (也即适应度) 附近, 该值收敛于最优位置; 当 $f_i = f_g$ 时, 处于种群中间的个体随机向外移动。

与其它群智能算法相比, SSA具有控制参数少、收敛速度快、求解精度高等特点<sup>[22]</sup>, 本文将SSA用于脉冲星定位定速测量, 通过SSA优化基于量子压缩感知的测量矩阵, 实现高精度超快速脉冲星定位定速联合估计。

## 2 麻雀优化量子

### 2.1 QCS

QCS设计了包含多个不同畸变和相移轮廓的脉冲星轮廓字典 $\Psi$ 。将轮廓字典 $\Psi$ 中各轮廓设为量子概率振幅, 利用量子的二向性和随机性, 对这些脉冲星轮廓字典的进行多次量子观测。每次观测得到一个量子测量矢量。

设 $\varphi(N \times 1)$ 是轮廓字典 $\Psi$ 中有畸变和相移的脉冲星轮廓, 则, 第 $n$  ( $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ )个量子位 $|\varphi(n)\rangle$ 可表示为

$$|\varphi(n)\rangle = \alpha(n)|0\rangle + \beta(n)|1\rangle \quad (4)$$

其中:  $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 表示量子的下旋和上旋2个状态;  $\alpha(n)$ 和 $\beta(n)$ 是2个幅度常数, 满足

$$|\alpha(n)|^2 + |\beta(n)|^2 = 1 \quad (5)$$

当采用脉冲星轮廓 $\varphi$ 作为量子概率振幅时, 有

$$|\beta(n)|^2 = \varphi(n) \quad (6)$$

因此, 可将第 $n$ 个量子位 $|\varphi(n)\rangle$ 重新整理得

$$|\varphi(n)\rangle = \sqrt{1 - \varphi(n)}|0\rangle + \sqrt{\varphi(n)}|1\rangle \quad (7)$$

对轮廓字典 $\Psi$ 的每次量子观测可得到一个量子测量矩阵, 多次量子观测则得到多个量子测量矩阵, 将这些量子测量矩阵组合而成QCS的量子测量矩阵 $\Phi$ 。

### 2.2 SSA适应度函数设计

SSA中第 $i$ 只麻雀个体的位置 $X_i$ 表示为

$$X_i = [X_i^1, \dots, X_i^d, \dots, X_i^I] \quad (8)$$

其中:  $I$ 为待优化问题的维数, 本文中 $I$ 代表测量母矩阵中子矩阵的数量。  $X_i^d$ 的取值为0或者1, 表示相对应的子矩阵是舍弃或者保留。由 $n$ 只麻雀个体构成的麻雀种群 $X$ 可表示为

$$X = [X_1, \dots, X_i, \dots, X_n]^T \quad (9)$$

麻雀种群的适应度 $F(X)$ 可表示为

$$F(X) = [f(X_1), \dots, f(X_i), \dots, f(X_n)]^T \quad (10)$$

$$f(X_i) = f([X_i^1, \dots, X_i^d, \dots, X_i^M]) \quad (11)$$

其中:  $f(X_i)$  表示第  $i$  只麻雀的适应度;  $M$  为麻雀种群数量。

SSA 的优化过程如图 1 所示, 虚线框为适应度函数, 包括待定测量矩阵、匹配和超分辨率估计等模块。其中, 绿色部分显示的是在 QCS 基础上 SSA 对测量母矩阵选择和优化。每只麻雀的位置代表对子矩阵的一种选择组合: 当值为“1”时, 保留相应的测量子矩

阵; 当值为“0”时, 则放弃相应的测量子矩阵。每次迭代后留下来的量子测量子矩阵组合构成了待定测量矩阵。然后通过感知矩阵、测量矢量、匹配矩阵和超分辨率匹配估计, 计算定位定速估计误差, 也即 SSA 的适应度。基于适应度的评估, 麻雀中的发现者、跟随者、预警者按照各自的位置更新规则进行全局和局部搜索。迭代将一直运行, 直到适应度函数收敛到最小或者到达迭代的上限, 迭代停止。最终得到优化的量子测量矩阵。

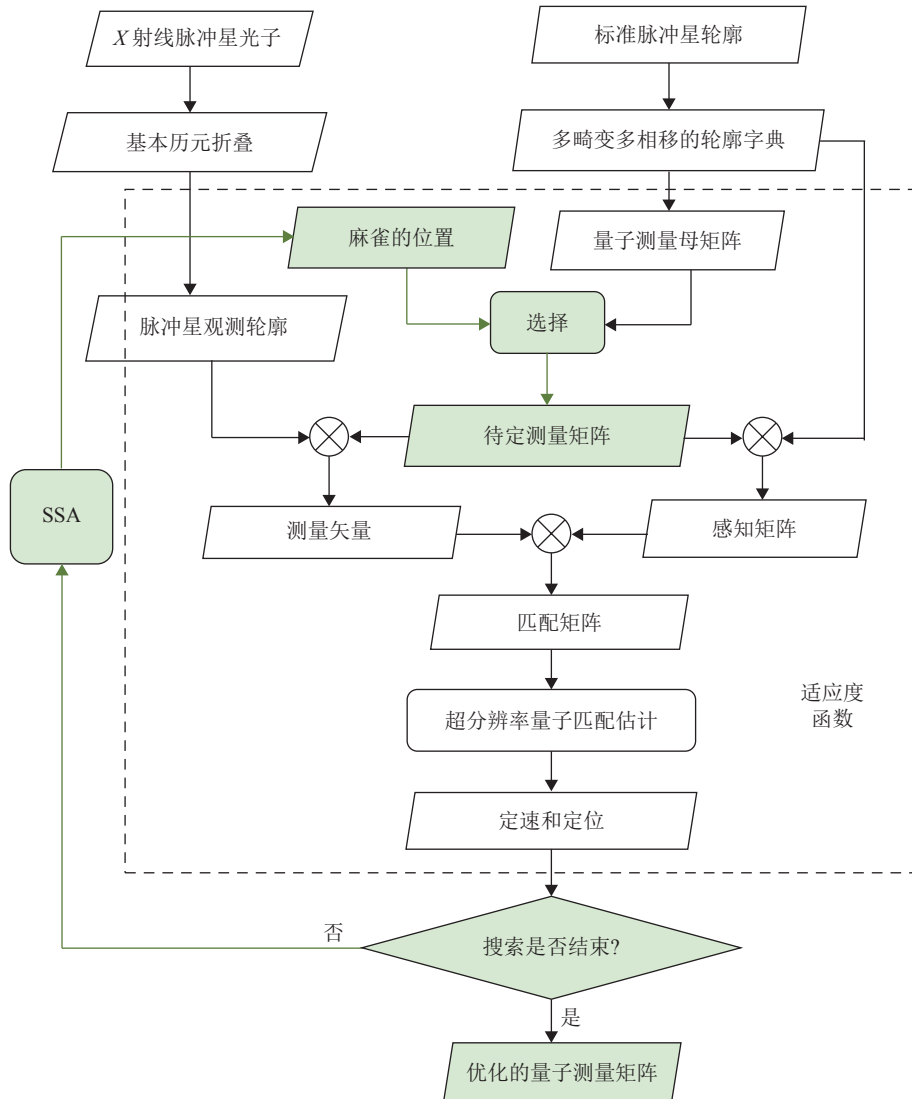


图 1 SSA 优化测量矩阵流程图  
Fig. 1 Diagram of SSA optimized measurement matrix

1) 待定测量矩阵。通过对脉冲星轮廓字典的多次量子观测, 得到量子测量母矩阵  $\Phi$

$$\Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_I] \quad (12)$$

其中:  $I$  是测量母矩阵中子矩阵的数量。利用麻雀位置在母矩阵中选出若干子矩阵和它们的组合, 形成待定测量矩阵  $\Phi_s$ 。

$$\Phi_s = X_i \cdot \Phi \quad (13)$$

由待定测量矩阵和轮廓字典得到感知矩阵 $\Theta$

$$\Theta = \Phi_s \cdot \Psi^T \quad (14)$$

2) 匹配和超分辨率估计。测量矩阵对脉冲星累积轮廓 $\mathbf{x}$ 的测量得到观测向量 $\mathbf{y}$

$$\mathbf{y} = \Phi_s \cdot \mathbf{x} \quad (15)$$

通过匹配观测向量 $\mathbf{y}$ 和感知矩阵 $\Theta$ 得到匹配矩阵 $\mathbf{S}$

$$\mathbf{S} = \mathbf{y} \cdot \Theta \quad (16)$$

$\mathbf{S}$ 中最大元素的索引 $\tilde{m}$ 和 $\tilde{n}$ 即为脉冲星累积轮廓 $\mathbf{x}$ 的畸变和相移,  $\tilde{m}$ 和 $\tilde{n}$ 的表达式为

$$[\tilde{n}, \tilde{m}] = \underset{n,m}{\operatorname{argmax}} [\mathbf{S}(n,m)] \quad (17)$$

为提高估计性能, 采用超分辨率量子匹配估计, 得出畸变 $\hat{m}$ 和相移 $\hat{n}$

$$\hat{m} = \tilde{m} - \frac{0.5 [\max(\mathbf{S}_{\tilde{m}+1}) - \max(\mathbf{S}_{\tilde{m}-1})]}{\max(\mathbf{S}_{\tilde{m}+1}) + \max(\mathbf{S}_{\tilde{m}-1}) - 2\mathbf{S}(\tilde{n}, \tilde{m})} \quad (18)$$

$$\hat{n} = \tilde{n} - \frac{\hat{m}}{2} - \frac{0.5 [\max(\mathbf{S}_{\tilde{n}+1}) - \max(\mathbf{S}_{\tilde{n}-1})]}{\max(\mathbf{S}_{\tilde{n}+1}) + \max(\mathbf{S}_{\tilde{n}-1}) - 2\mathbf{S}(\tilde{n}, \tilde{m})} \quad (19)$$

定速误差 $\hat{v}$ 可表示为

$$\hat{v} = \frac{c \times T_p}{N \times T_{\text{obs}}} \hat{m} \quad (20)$$

其中:  $T_p$ 为脉冲星周期;  $T_{\text{obs}}$ 为观测周期。

定位误差 $\hat{p}$ 可表示为

$$\hat{p} = \frac{c \times T_p}{N} \hat{n} \quad (21)$$

将100次蒙特卡罗估计的 $\hat{v}$ 和 $\hat{p}$ 的标准差组合作为SSA的适应度值 $f$

$$f = \frac{\operatorname{std}(\hat{p}) + \operatorname{std}(\hat{v}) \times T_{\text{obs}}}{2} \quad (22)$$

其中:  $\operatorname{std}$ 为标准差。

### 2.3 计算复杂度

SSA-QCS中SSA的运行时间与麻雀种群数量、迭代次数等有关。在实际系统中, 脉冲星轮廓字典和优化后的量子测量矩阵可以预先在地面分析出来, 不占用有限的器载计算机资源。X射线脉冲星光子的收集和脉冲星轮廓的累积可以在线同步进行, 因此同QCS一样, SSA-QCS也只需关注匹配估计部分。但是由于SSA-QCS的优化量子测量矩阵要小于QCS的, 所以SSA-QCS的用时要比QCS少。

匹配估计部分的计算量主要决定于测量矢量和量子匹配估计这两个模块。测量矢量模块的计算量正比于量子测量矩阵和脉冲星观测轮廓乘积的大小。设

SSA-QCS的量子测量矩阵的数量为 $M_s$ ,  $D$ 、 $P$ 和 $N$ 分别为最大畸变度、最大相移和一个周期内的间隔总数, 则SSA-QCS的计算量为 $2M_s \times D \times P \times N$  MAC。量子匹配估计模块的计算量正比于测量矢量和感知矩阵的乘积, 约为 $2(M_s \times D \times P) \times (D \times P) = 2M_s \times D^2 \times P^2$  MAC (MAC指一个计算单元)。

总计算量为这两部分之和, 即

$$\begin{aligned} 2M_s \times D \times P \times N + 2M_Q \cdot D^2 \cdot P^2 = \\ 2M_s \times D \times P \times (N + D \times P) \approx \\ 2M_s \times D \times P \times NMAC \end{aligned} \quad (23)$$

因为 $(D \times P) \ll N$ , 所以SSA-QCS的计算量近似为 $2M_s \times D \times P \times N$  MAC。

设 $M_Q$ 为QCS的量子测量矩阵的数量, 则QCS的计算量近似为 $2M_Q \times D \times P \times N$  MAC。设 $N$ 、 $P$ 、 $D$ 、 $M_Q$ 和 $M_s$ 的取值分别为33 000、41、21、20和13, 代入式(23)可得, SSA-QCS计算量约为 $7.39 \times 10^8$  MAC, 比QCS的计算量减少了35%。正是由于SSA-QCS优化了QCS的量子测量矩阵大小, 使得匹配估计时间大幅缩短, 真正实现了实时超快速定位定速联合估计。在第3节仿真实验中对QCS和SSA-QCS的计算时间进行了对比分析。

## 3 仿真实验

本节通过仿真实验将SSA-QCS与QCS进行对比, 验证SSA-QCS的高估计精度和实时性。

仿真实验选择蟹状星云(Crab)脉冲星PSR B0531+21为测试对象。Crab脉冲星的标准轮廓由欧洲脉冲星数据库提供<sup>[23]</sup>; 脉冲星周期约为 $33 \mu\text{s}$ <sup>[24]</sup>; 脉冲星光子流量密度为 $1.54 \text{ ph}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ <sup>[25]</sup>; X射线背景流量、探测器有效面积和分辨率分别为:  $0.005 \text{ ph}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 、 $400 \text{ cm}^2$ 和 $1 \mu\text{s}$ <sup>[26]</sup>。因此, 一个周期内的间隔总数 $N$ 为33 000。脉冲星观测周期设为1 000 s。

### 3.1 SSA-QCS与QCS

SSA-QCS与QCS的对比结果见表1。表1的第1列为QCS的测量矩阵大小, 等于 $M \times D \times P \times N$ , 其中,  $D=21$ ,  $P=41$ ,  $N=33 000$ <sup>[20]</sup>。随着测量矩阵大小的增大, QCS的定位和定速估计误差均减小。当测量矩阵大小为 $17 220 \times 33 000$ 时, QCS的定位和定速估计误差最小。该测量矩阵有20个子矩阵, 选择该测量矩阵作为SSA-QCS的测量母矩阵, 因此设SSA中麻雀位置的维数为20。通过SSA对测量母矩阵搜索优化, 最终得出由13个量子测量矩阵组成的优化测量矩阵, 大小为 $11 193 \times 33 000$ 。使用该优化测量矩阵进行定位和定速估计, 结果如表1所示的SSA-QCS列。

表 1 SSA-QCS与QCS

Table 1 Comparison between SSA-QCS and QCS

测量矩阵大小	QCS			SSA-QCS			$\chi^2$ 定速	
	定位误差/m	定速误差/ (m·s <sup>-1</sup> )	时间/s	定位误差/m	定速误差/ (m·s <sup>-1</sup> )	时间/s	定速误差/ (m·s <sup>-1</sup> )	时间/s
2 583×33 000	957.362	0.941	0.360	—	—	—	—	—
6 027×33 000	773.408	0.744	0.865	—	—	—	—	—
9 471×33 000	730.153	0.687	1.346	—	—	—	1.390	1.145
11 193×33 000	722.385	0.683	1.987	574.68	0.5593	1.898	—	—
17 220×33 000	678.095	0.644	2.775	—	—	—	—	—

可以看出, SSA-QCS的优化测量矩阵的大小相当于QCS中11 193×33 000的测量矩阵。SSA-QCS的定位和定速估计精度不仅高于QCS中测量母矩阵对应的定位和定速估计精度, 更远高于QCS中与其大小相等的测量矩阵的定位和定速估计精度。计算时间也较QCS减少, 减少量与理论相符。

因此, 具有小尺寸优化测量矩阵的SSA-QCS在估计精度和计算时间上都优于QCS。这是因为SSA-QCS利用了SSA对QCS的测量矩阵进行了优化, 优化后的测量矩阵只包含原矩阵中若干个子矩阵, 并且是它们的最优组合。

表1还对比了SSA-QCS与经典 $\chi^2$ 定速。可看出SSA-QCS的估计精度明显高于 $\chi^2$ 定速方法。因为SSA-QCS实现了定位和定速联合估计,  $\chi^2$ 定速仅是定速估计, 所以SSA-QCS的计算时间较 $\chi^2$ 定速稍长。

为验证SSA的有效性, 分别对比了SSA、烟花算法(FireWork Algorithm, FWA)和遗传算法(Genetic Algorithm, GA)对相同测量母矩阵优化后的测量结果, 如表2所示。可看出3种方法均能够得到小尺寸的优化矩阵, 定位定速精度均优于QCS。其中, SSA的收敛时间较FWA和GA更短, 收敛代数更少, 定位和定速精度也优于FWA和GA, 说明SSA的收敛性和优化精度较好。

表 2 SSA、FWA与GA优化结果对比

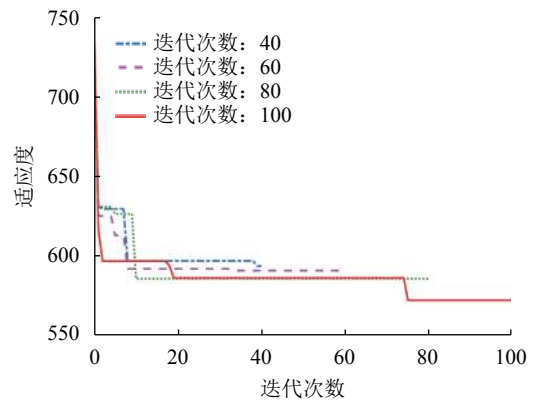
Table 2 Comparison of optimization result among SSA, FW and GA

方法	优化后的测量矩阵大小	收敛时间/s	收敛代数/次	定位误差/m	定速误差/ (m·s <sup>-1</sup> )
SSA	11 193×33 000	10 780	18	574.68	0.559 3
FWA	11 193×33 000	46 530	34	692.70	0.624 7
GA	9 471 × 33 000	35 700	20	611.68	0.591 0

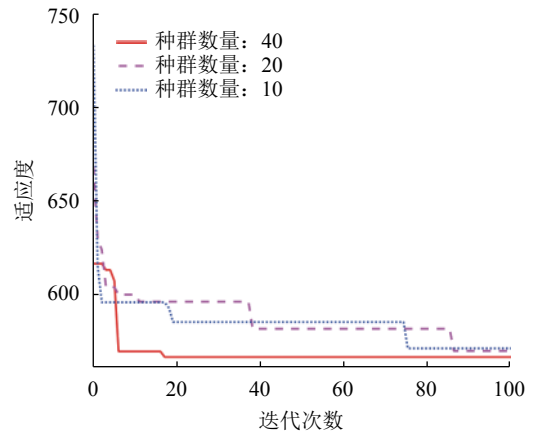
### 3.2 麻雀种群数量和迭代次数

麻雀种群数量和迭代次数决定了模型的收敛情况。不同种群数量和迭代次数下适应度函数的变化如图2所示。图2(a)显示了相同种群数量下不同迭代次数的收敛情况。可看出不同迭代次数下适应度函数均能收敛。若迭代次数过少, 如40次, SSA寻优值不佳; 随

着迭代次数的增多, 适应度收敛值越小。图2(a)中迭代次数为100次的适应度收敛值最小, 但迭代次数的增多也会带来一定的时间开销。图2(b)显示了迭代次数为100时不同种群数量的收敛情况。可看出, 种群数量越大, SSA搜索越充分, 适应度收敛值越小。综合上述, 本文将种群数量和迭代次数分别设为40和100。



(a) 不同迭代次数



(b) 不同种群数量

图 2 麻雀种群数量和迭代次数

Fig. 2 Sparrow population and iteration

### 3.3 鲁棒性

为测试SSA-QCS的鲁棒性, 100次独立蒙特卡罗实验的定位和定速误差如图3所示。每次实验使用相同的量子测量矩阵和随机生成的具有相同畸变和相移的脉冲星观测轮廓。

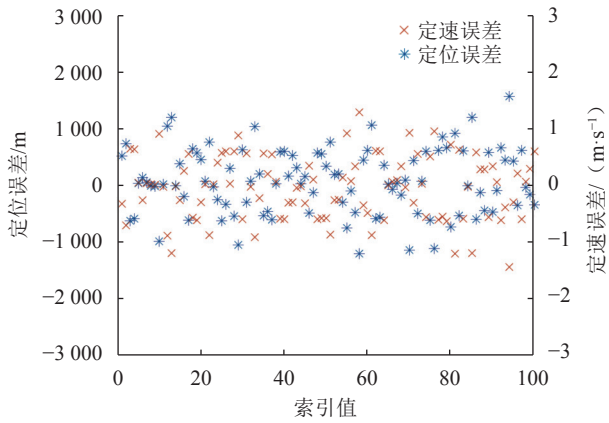
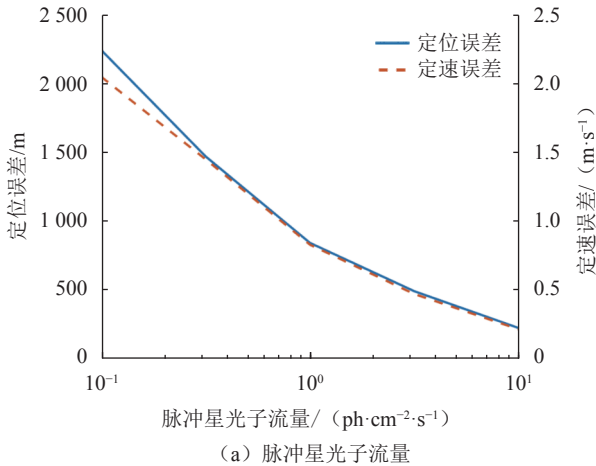
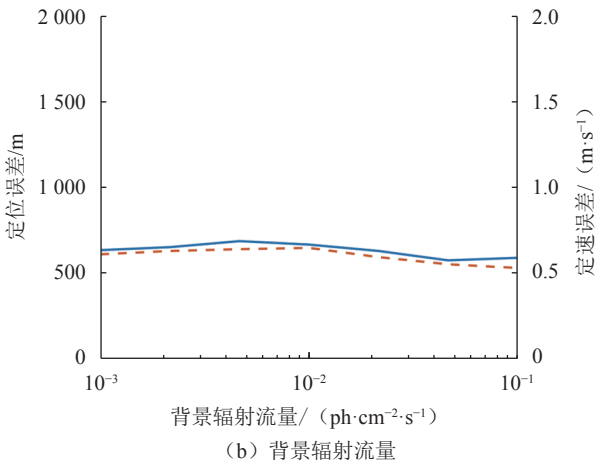


图3 SSA-QCS的鲁棒性  
Fig. 3 Randomness of SSA-QCS

由图3可看出, 定位误差大致集中在-1000~1000 m内, 定速误差大致集中在区间-1~1 m/s内。并且可得出, 定位与定速负相关, 相关系数为-0.990 2。结果



(a) 脉冲星光子流量



(b) 背景辐射流量

图4 脉冲星光子流量和背景辐射流量  
Fig. 4 Pulsar and background radiation flux

表明SSA-QCS对不同的脉冲星观测轮廓具有一定的鲁棒性。

### 3.4 脉冲星光子流量、背景辐射流量、X射线探测器面积和观测周期

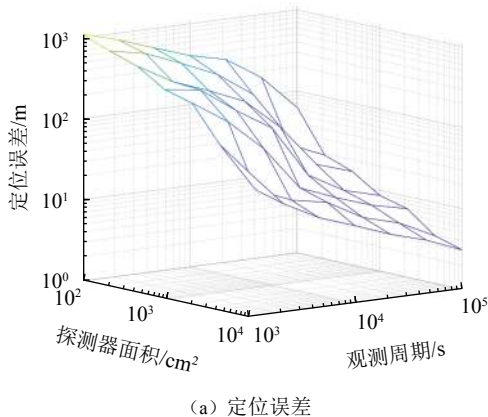
#### 1) 脉冲星光子流量和背景辐射流量

脉冲星轮廓SNR对SSA-QCS的性能也有很大的影响, 它与脉冲星光子流量和背景辐射流量相关。不同脉冲星光子流量和背景辐射流量下SSA-QCS的定位和定速误差如图4所示。从图4 (a) 可看出定位和定速误差随着脉冲星光子流量的增加而下降, 而图4 (b) 中它们随背景辐射流量的变化均不明显。此外, 还可看出定位和定速误差的变化几乎一样。因此, 具有高流量的X射线脉冲星有助于提高定位和定速估计的精度。当背景辐射流量小于0.1 ph/(cm<sup>2</sup>·s) 时, 背景辐射流量的降低对定位和定速估计精度的提高不明显。

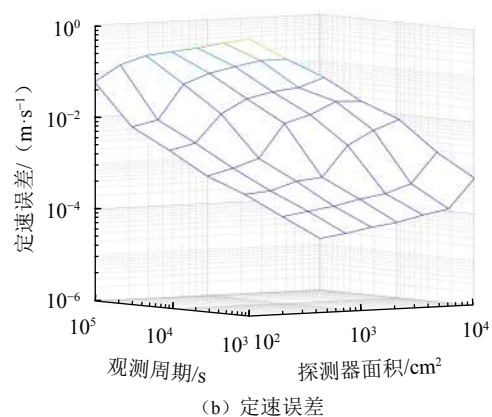
#### 2) 探测器面积和观测周期

探测器面积和观测周期的影响如图5所示。从

图5 (a) 和图5 (b) 可看出, 随着探测器面积和观测周期的增大, 定位和定速误差都在减小。说明定位和



(a) 定位误差



(b) 定速误差

图5 X射线探测器面积和观测周期  
Fig. 5 Observing time and X-ray effective area

定速误差与探测器面积和观测周期均成反比变化。另一方面, X射线探测器面积大将增大航天器负荷, 观测周期长将增加器载计算机的计算量。因此, X射线探测器面积和观测周期要综合考虑。

## 4 结 论

QCS通过对脉冲星轮廓的多个基于量子的观测构造出量子测量矩阵, 实现脉冲星的快速定位定速。其中, 量子测量矩阵的大小影响了QCS的估计精度和实时性。为减少计算量和提高估计精度, 本文提出了基于麻雀优化量子压缩感知的快速脉冲星定位定速方法——SSA-QCS。SSA-QCS利用SSA对QCS的量子测量母矩阵进行搜索, 选择出合适的子矩阵, 构造出一种新的小尺寸高性能量子测量矩阵。

与QCS相比, SSA-QCS的性能更优。SSA-QCS具有以下优点: ① 计算量小, SSA优化的量子测量矩阵比量子测量母矩阵小, 由于SSA优化后的测量矩阵较小, 计算量明显减少; ② 高精度, 利用麻雀算法的优化策略, 选择高性能的子矩阵构成新的量子测量矩阵。综上所述, SSA-QCS利用麻雀算法优化了量子测量矩阵, 具有高精度和低计算量的特点。

## 参 考 文 献

- [1] 房建成, 宁晓琳, 刘劲, 等. 航天器自主天文导航原理与方法(第2版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [2] RODIN A E, ORESHKO V V, POTAPOV V A, et al. Principles of pulsar space navigation[J]. *Astronomy Reports*, 2020, 64(6): 499-525.
- [3] 武达亮, 吴谨, 刘劲, 等. 复合测速X射线脉冲星导航方法[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2021, 8(6): 632-640.  
WU D L, WU J, LIU J, et al. X-Ray pulsar navigation based on hybrid velocimetry method[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2021, 8(6): 632-640.
- [4] ZHENG W, WANG Y. Introduction in X-ray pulsar-based navigation: theory and applications[M]. Springer: Singapore, 2020: 1-24.
- [5] SHEIKH S I. The use of variable celestial X-ray source for spacecraft navigation[D]. Maryland, USA: University of Maryland, 2005.
- [6] 喻子原, 刘劲, 宁晓琳, 等. 面向编队飞行的天文多普勒差分/脉冲星组合导航[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2018, 5(3): 212-218.  
YU Z Y, LIU J, NING X L, et al. Celestial Doppler difference/pulsar for formation flying and its integrated navigation[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(3): 212-218.
- [7] 张大鹏, 李治泽, 王奕迪, 等. X射线脉冲星动态信号处理方法研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2019, 6(4): 335-340.  
ZHANG D P, LI Z Z, WANG Y D, et al. Dynamic data processing for X-Ray pulsar signal[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(4): 335-340.
- [8] XU Q, FAN X H, ZHAO A G, et al. Pre-correction X-ray pulsar navigation algorithm based on asynchronous overlapping observation method[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 67(1): 583-596.
- [9] WANG Y S, WANG Y D, ZHENG W. On-orbit pulse phase estimation based on CE-Adam algorithm[J]. *Aerospace*, 2021, 8(4): 95.
- [10] 易韦韦, 偶晓娟, 许静文, 等. 脉冲星导航试验卫星观测数据处理与分析[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2018, 5(3): 241-245, 261.  
YI W W, OU X J, XU J W, et al. Processing and analysis of X-Ray pulsar-based navigation test satellite observation data[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(3): 241-245, 261.
- [11] NING X L, GUI M Z, FANG J C, et al. Differential X-ray pulsar aided celestial navigation for Mars exploration[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 62: 36-45.
- [12] 苏哲, 许录平, 甘伟. 基于压缩感知的脉冲星轮廓构建算法[J]. *中国物理: 物理学力学天文学*, 2011, 41(5): 681-684.  
SU Z, XU L P, GAN W. Pulsar profile construction algorithm based on compressed sensing[J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2011, 41(5): 681-684.
- [13] LIU J, YANG Z H, KANG Z W, et al. Fast CS-based pulsar period estimation method without tentative epoch folding and its CRLB[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 160: 90-100.
- [14] 刘劲, 韩雪侠, 宁晓琳, 等. 基于EMD-CS的脉冲星周期超快速估计[J]. *航空学报*, 2020, 41(8): 623486.  
LIU J, HAN X X, NING X L, et al. Ultra-fast estimation of pulsar period based on EMD-CS[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(8): 623486.
- [15] SHEN L R, LI X P, SUN H F, et al. A robust compressed sensing based method for X-ray pulsar profile construction[J]. *Optik- International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(10): 4379-4385.
- [16] LIU J, FANG J C, LIU G. Observation range-based compressive sensing and its application in TOA estimation with low-flux pulsars[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 148: 256-267.
- [17] 康志伟, 吴春艳, 刘劲, 等. 基于两级压缩感知的脉冲星时延估计方法[J]. *物理学报*, 2018, 67(9): 285-292.  
KANG Z W, WU C Y, LIU J, et al. Pulsar time delay estimation method based on two-level compressed sensing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(9): 285-292.
- [18] HAN X X, DU T X, PAN C, et al. Similar Hadamard-based compressive sensing and its application in pulsar TOA estimation[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2019, 197: 163270.
- [19] LIU L L, LIU J, NING X L, et al. Real-time and accurate pulsar time-of-arrival estimation using GA-optimized EMD-CS[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2021, 225(2): 165871.
- [20] WU D L, WU J, LIU J, et al. Quick X-ray pulsar positioning and velocimetry approach based on quantum CS[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2021, 241: 166649.
- [21] XUE J, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2020, 8(1): 22-34.
- [22] 李丹丹, 吴宇翔, 朱聪聪, 等. 基于多种改进策略的改进麻雀搜索算法[J]. *计算机科学*, 2022, 49(S1): 217-222.  
LI D D, WU Y X, ZHU C C, et al. Improved sparrow search algorithm based on a variety of improved strategies[J]. *Computer Science*, 2022, 49(S1): 217-222.

- [23] Jodrell Bank Pulsar Group. EPN database browser [EB/OL]. (2020) [2023-03-21]. <http://www.jb.man.ac.uk/~pulsar/Resources/epn/browser.html>.
- [24] SHEIKH S I, PINES D J, RAY P S, et al. Spacecraft navigation using X-ray pulsars[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, 29(1): 49-63.
- [25] CRAVEN P H, COLLINS J T. Spacecraft navigation X-ray pulsars[C]//*Proceedings of the 7<sup>th</sup> International ESA Conference on Guidance*. [S. l.]: ESA, 2008.
- [26] DENNIS W W. The use of X-ray pulsars for aiding GPS satellite orbit determination[D]. Springs, CO: Air Force Institute of Technology, 2005.

作者简介:

**武达亮**(1982-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向: 脉冲星导航、信号处理。

通信地址: 湖北省武汉市青山区和平大道947号武汉科技大学信息科学与工程学院(430081)

电话: (027)68862053

E-mail: wudaliang@wust.edu.cn

**刘劲**(1981-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 脉冲星导航。**本文通信作者。**

通信地址: 湖北省武汉市青山区和平大道947号武汉科技大学信息科学与工程学院(430081)

电话: (027)68862516

E-mail: liujin@wust.edu.cn

## Pulsar Positioning and Velocimetry Method Based on Sparrow Search Algorithm-Optimized Quantum CS

WU Daliang<sup>1</sup>, LIU Jin<sup>1</sup>, WU Jin<sup>1</sup>, NING Xiaolin<sup>2</sup>, KANG Zhiwei<sup>3</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;

2. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. College of Computer Science and Electronic Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The size of the quantum measurement matrix in the Quantum based CS (QCS) of X-ray pulsar positioning and velocimetry method is large. To reduce calculation time, a fast Quantum-CS method based on the Sparrow Search Algorithm optimization (SSA-QCS) was proposed and applied to the pulsar positioning and velocimetry. The quantum measurement mother matrix in QCS was divided into multiple sub-matrices. The quantum measurement sub-matrices were selected from the quantum measurement mother matrix through SSA. With the location of every sparrow corresponding to the combination of quantum measurement sub-matrices, with the estimation errors of the positioning and velocimetry in QCS as the object of the fitness function, through iterations, the optimal combination of the quantum measurement sub-matrices was obtained, forming a small-sized and high-performance quantum measurement matrix. Simulation results show that the SSA-QCS has a lower calculation cost and higher accuracy compared with the QCS. SSA-QCS can reach high-accuracy and real-time X-ray pulsar positioning and velocimetry.

**Keywords:** SSA; CS; X-ray pulsar; positioning; velocimetry

**Highlights:**

- A fast Quantum-CS method based on the Sparrow Search Algorithm optimization (SSA-QCS) is proposed to reduce the size of the quantum measurement matrix.
- The estimation accuracy of the positioning and velocimetry is higher and the calculation cost is lower compared with the QCS.
- The fast simultaneous estimation of the pulsar positioning and velocimetry is realized.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]