

基于量子遗传算法的多光电二极管布局优化

褚理想, 樊巧云

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 光电二极管是一种体积小、成本低的感光传感器, 由至少三个配合可实现太阳矢量的测量, 从而可以作为低精度的太阳敏感器。为了尽可能实现在 360° 视场空间任意方位求解太阳矢量, 如何选择光电二极管数量并确定其布局方式是一个难点。文中首先将 360° 视场空间等表面积离散化, 将无限的传感器的布局优化问题转换为有限的组合优化(NP 问题难)。然后, 通过建立覆盖度和均匀度的多目标优化函数, 并结合量子遗传算法求解最优方案。实验分析了不同光电二极管数量和视场范围的布局效果, 对多光电二极管的布局优化提供了理论性依据。实验结果显示, 选择 12~14 个光电二极管可以基本实现无覆盖风险和均匀风险的布局。

关键词: 布局优化; 组合优化; 光电二极管; 太阳敏感器; 量子遗传算法

中图分类号: V448.22 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0813002

Multi-photodiode layout optimization based on quantum genetic algorithm

Chu Lixiang, Fan Qiaoyun

(School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: As a small and low-cost photosensor, the photodiode can be used as low-precision sun sensor alternatively for at least three photodiodes combined, to measure the full sun vector. To obtain the sun vector anywhere providing the continus 360° filed-of-view, it was difficult to choose the number and design the layout of the multiple photodiodes. This paper discretized the 360° field of view as equal surface areas firstly, and transformed the infinite sensor layout optimization problem into a finite combinatorial optimization (nondeterministic polynomial time). Then, the combinatorial optimization problem was solved by establishing the multi-objective optimization function considering the coverage and uniformity and combining the quantum genetic algorithm. The experiment gave the layout effect for the various number and the different field of view of photodiodes, and provided theoretical basis for the optimization of the layout of multiple photodiodes. The experimental results show that the 12-14 photodiodes selected can achieve layout with no coverage and uniform risk nearly.

Key words: layout optimization; combinatorial optimization; photodiodes; sun sensor; quantum genetic algorithm

收稿日期: 2019-03-05; 修订日期: 2019-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(61475012)

作者简介: 褚理想(1993-), 男, 硕士生, 主要从事微型太阳敏感器方面的研究。Email: lixiang_buaa@buaa.edu.cn

导师简介: 樊巧云(1978-), 女, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光电精密测量、天体敏感器及天文导航、机器视觉方面的研究。Email: fqy@buaa.edu.cn

0 引言

太阳敏感器是卫星重要的姿态测量部件之一。随着微小、微纳卫星的发展和广泛应用,体积和成本的制约因素促使人们不断寻找体积更小、成本更加低廉的姿态测量部件^[1]。光电二极管作为一种成本低廉、体积更小的感光传感器,根据其输出电压可以测算太阳矢量方向,因此作为低精度的太阳敏感器具有广阔地应用前景。

单个光电二极管仅提供单个太阳矢量分量的测量,至少 3 个光电二极管才能唯一确定太阳矢量。同时,现有的光电二极管视场范围一般小于 180°,不适宜直接采用正交布局方式。若想在 360°视场测量空间都能有效地求解太阳矢量,需要多个光带二极管组合才能实现。良好的多光电二极管布局方式可以有效提高传感器的利用率,减少传感器的数量。然而,每个光电二极管需要两个安装参数(安装高度角和安装方位角), N 个传感器需要 $2N$ 个安装参数,由于参数空间的复杂性,难以在多项式时间内求解最优解(NP 难问题)^[2]。因此,如何选择光电二极管数量并确定最优布局方位是多光电二极管应用的难点。

光电二极管的传统布局方法是直接表贴于卫星各个表面,常见的卫星构型有立方体^[3]、双锥体^[4]、截棱锥^[5]等。该方法直接简单,但二极管的利用率和视场范围受限于卫星本身的构型。参考文献[2,6-7]等提出了不依赖于卫星构型的布局和优化方案。参考文献[6]等依赖人工经验给定的初始布局方案,并在此基础上优化和调整部分光电二极管安装参数。参考文献[7]分析了太阳敏感器在易受天线、星敏感器等物品遮挡下的布局优化问题。参考文献[2]以光电二极管视场角 180°为前提,分析实现 360°视场空间的任意方位所需最小的传感器数量。

量子遗传算法^[8-9]是一种模拟种群进化与变异的一种随机搜索策略,以概率表示的量子比特为基本信息位进行解空间编码,用量子变异实现种群进化,并用最优解信息引导量子变异过程。与其他进化方法对比,量子遗传算法具有收敛快、全局搜索能力强的特点,可用于求解组合优化等 NP 难问题。文中基于量子遗传算法提出一种多光电二极管布局优化方法。该方法首先将 360°视场空间等表面积离散化,将无限的传感器的布局优化问题转换为有限的组合

优化问题。针对光电二极管需要多个才能确定太阳矢量的特性,设计多目标适应度函数,提高 360°视场整体测量空间的太阳矢量存在解的概率和减少连续的时间或空间无解的概率。最后本文给出不同数量和不同视场范围下的光电二极管布局效果,以及各方案对应的视场覆盖风险和均匀风险,从而为光电二极管的选取和布局提供理论依据。

1 多光电二极管布局问题的简化

如图 1 所示,单个光电二极管的安装轴方位可以使用安装高度角 ϕ 和安装方位角 θ 表示的单位矢量描述,其所有可能的安装方位可以用单位球中心到球表面点的矢量表示。多个传感器布局可以描述为多个单位矢量在单位球的分布问题。为简化问题,将单位球离散化或者像素化,将无限的布局方案转换为有限的组合优化问题。图 2 为基于二十面体^[10]离散化单位球的方法示意图,该方法可以产生接近球面均等分布的离散点。其实现过程大致分为以下几个步骤:

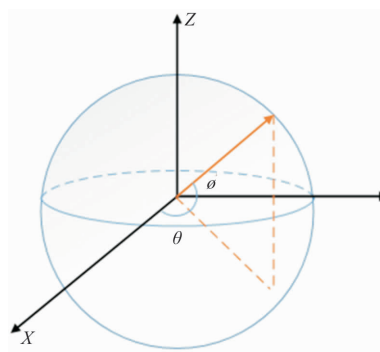


图 1 光电二极管安装方位的示意图

Fig.1 Schematic diagram of photodiode mounting orientation

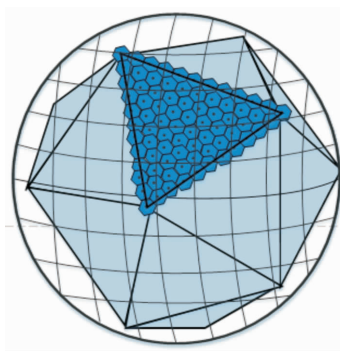


图 2 单位球离散方法示意图

Fig.2 Schematic diagram of unit sphere discrete method

(1) 使用二十面体内嵌单位球,并且将二十面体的每个面使用正六边形离散化;

(2) 将离散化点沿径向投影到单位球上;

(3) 微调离散点位置,使所有离散点覆盖的面积近似于相等。

这种方法产生的离散化点数不是任意的,而是满足如下规律:

$$N=40r(r-1)+12 \quad (1)$$

式中: $r=1,2,3, \dots$ 表示二十面体被等分的数量。当 $r=4$ 时,单位球被离散化为 $N=492$ 个点,如图 3 所示,离散化后的球面点按照方位角 θ 和高度角 ϕ 展开成二维散点图。

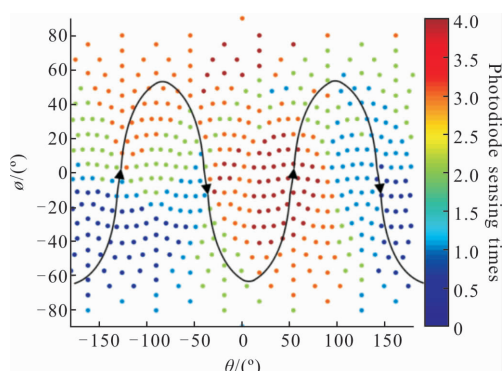


图 3 单位球离散化平面展开图

Fig.3 Unit sphere discretization plane development

假设二极管数量为 m ,每个二极管的安装方位用球面离散化点表示,此时传感器布局问题简化为在 N 个离散化点中选取 m 个点,使得整个单位球布局效果最优。为减少计算,可将一个光电二极管固定在顶点 $(0.0,0.0,1.0)$,因为球表面任意一点均可通过旋转变换到达顶点。

2 多目标优化函数

多光电二极管分布不仅要考虑在 360° 视场范围内一方位太阳矢量的可解性,还要考虑如何降低在连续时间或连续空间的无解的可能性。文中针对多光电二极管分布的覆盖度和均匀度建立多目标优化函数。

2.1 多光电二极管分布的覆盖度

光电二极管测量太阳矢量的关键是太阳矢量在光电二极管敏感轴的分量,根据 Λ 的余弦效应^[1]可以计算其输出电压,可用下式表示:

$$V_d=n^T s_b=\cos(\varphi) \quad (2)$$

式中: $n=[\cos(\phi)\cos(\theta)\cos(\phi)\sin(\theta)\sin(\phi)]^T$ 为光电二极管高度角 ϕ 和方位角 θ 表示的太阳敏感轴方向向量; s_b 为太阳矢量在本体坐标系下的表示; φ 为光电二极管敏感轴与太阳矢量的夹角。单个光电二极管的测量模型为一个锥形,图 4 为两个光电二极管的视场相交情况。从图 4 可以看出,光电二极管相交存在两个太阳矢量解,若想唯一的确定太阳矢量一般需要至少 3 个光电二极管。

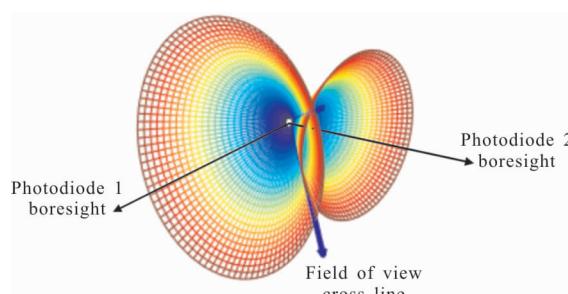


图 4 两个光电二极管求解太阳矢量示意图

Fig.4 Schematic diagram of solving the sun vector with two photodiodes

在给定多个传感器安装方位时,可以采用下式描述视场空间的覆盖度:

$$F_c=k_0N_0+k_1N_1+k_2N_2+k_3N_3+k_4N_4+k_5N_5 \quad (3)$$

式中: $N_j(j=0,1,2,3,4)$ 表示被 j 个传感器视场覆盖的离散点数量; N_5 表示被 5 个或更多于 5 个传感器覆盖。 k_i 表示权重系数,期望离散点被 3 个或 4 个传感器覆盖,其取值为 $k_0=-15,k_1=-10,k_2=-1,k_3=10,k_4=-12,k_5=-5$ 。实验中采用被少于三个光电二极管覆盖的点集比例表示覆盖风险,用于评价覆盖度。

2.2 多光电二极管分布的均匀度

如图 3 所示,黑色曲线是太阳矢量相对于卫星本体坐标系随时间的变化,离散点的颜色随被传感器覆盖的次数而变化,如离散点 $(\theta=0^\circ,\phi=-90^\circ)$ 仅在一个光电二极管的视场范围内。整个视场内存在较多的无效区域(被少于 3 个传感器覆盖的连续区域),此时在一段时间内均无法有效获取太阳矢量,将对卫星的控制和姿态的获取带来极大的隐患。为此希望传感器较为均匀的分布,分散化无效区域,降低长时间无法求解太阳矢量的风险。此外,仅采用公式(3)描述视场空间的覆盖度易引起多传感器安装方位彼此聚集靠拢,使得集聚的局部区域覆盖度明显提

高,而无效区域明显增大。

图 5 为传感器 1 与周围传感器视场范围重叠的二维平面投影图,其中小方块代表传感器位置,圆形区域代表传感器感测的视场范围。两个传感器视场重叠区域的大小与两传感器的间距有关,采用下面等式描述传感器 1 的视场覆盖情况:

$$D_1 = \frac{w_{1,2}d_{1,2}}{R_1+R_2} + \frac{w_{1,3}d_{1,3}}{R_1+R_3} + \dots + \frac{w_{1,p}d_{1,p}}{R_1+R_p} \quad (4)$$

式中: R_i 表示第 i 个传感器的感测半径; $d_{i,j}$ 表示传感器 i 和传感器 j 的球面距离; $w_{i,j}$ 为权重系数与传感器 i 和传感器 j 的视场重叠面积有关; p 表示与当前传感器有交集的周围传感器数目。

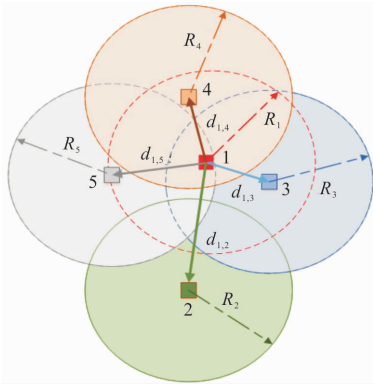


图 5 多光电二极管视场覆盖平面图

Fig.5 Multi-photodiode field of view coverage plane

对于 m 个传感器,期望其均匀的布满整个单位球,其均匀度可表示为:

$$F_d = \frac{D_1 + D_2 + \dots + D_m}{\text{Var}(D_1, D_2, \dots, D_m) + \eta} \quad (5)$$

式中: η 为一常数,一定程度上约束 F_d 的最大值。实验中采用最大无效区域面积占比表示均匀风险,用于评价均匀度。

综上,可以得到选择最优个体和精英个体的适应度函数:

$$F = F_c \times F_d \quad (6)$$

3 量子遗传算法

3.1 染色体的量子概率编码

量子遗传算法建立在量子态表述基础上,将量子比特的概率幅值表示应用于染色体的编码,使得一条染色体可以表示多个态的叠加,并利用量子旋转门和量子非门实现染色体的更新操作,从而实现

了目标的优化求解。区别于比特仅能表示 0、1 状态,量子比特还可表示 0 和 1 的任意叠加状态,其表达形式和约束条件如下:

$$\begin{aligned} \psi &= \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \\ \alpha^2 + \beta^2 &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 表示两种不同的量子态; (α, β) 为一对复常数对,表示量子比特的概率幅度。

类比于染色体由多对等位基因构成,一条染色体可以看出多个量子比特位的线性叠加, m 个比特位的染色体可表示为:

$$\Omega = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \dots & \alpha_m \\ \beta_1 & \beta_2 & \dots & \beta_m \end{bmatrix} \quad (8)$$

对于 m 个比特位,可以同时表示 2^m 个状态。例如,一个三个比特位的量子染色体:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

其组成的八个可能量子状态为:

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2\sqrt{6}}|000\rangle + \frac{1}{2\sqrt{2}}|001\rangle + \frac{1}{2\sqrt{3}}|010\rangle + \frac{1}{2}|011\rangle + \\ &\frac{1}{2\sqrt{6}}|100\rangle + \frac{1}{2\sqrt{2}}|101\rangle + \frac{1}{2\sqrt{3}}|110\rangle + \frac{1}{2}|111\rangle \end{aligned}$$

从概率角度来看,状态 000,001,010,011,100,101,110,111 的概率分别为: $\frac{1}{24}, \frac{3}{24}, \frac{2}{24}, \frac{6}{24}, \frac{1}{24}, \frac{3}{24}, \frac{6}{24}, \frac{3}{24}$ 。量子编码到二进制编码可以通过随机

试验的方法确定,其转换方法为:产生一个 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数 η_i ,如果 $\eta_i \leq |\alpha_i|^2$,则取 1,否则取 0。

每个光电二极管安装方位可以使用二进制字符串表示唯一的量子状态,二进制长度 B 满足 $2^{B-1} < N \leq 2^B$,其中 N 为单位球离散化点数。例如当分辨率 $r=4$,此时 $N=492$, B 的取值为 8,即每个光电二极管的安装方位可用 8 个二进制字符串表示。长度为 B 的二进制集合 $1, 2, 3, \dots, 2^B$ 和单位球离散点集合 $1, 2, 3, \dots, N$ 不一定满足一一对应的映射关系,通过公式(9)建立两个集合映射关系:

$$x' = \frac{x}{2^B} N \quad (9)$$

式中: x 表示二进制集合个体; x' 表示对应的单位球离散点集个体。

对于 M 个光电二极管,其染色体的量子位长度

为 $N \times B$, 其初始状态可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \dots & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \dots & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \dots & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}_{N \times B} \quad (10)$$

3.2 量子遗传算法的具体实现

染色体的量子概率编码赋予了单个个体的表达和搜索能力,由染色体簇组成的种群其搜索和迭代更新的主要操作流程为:转盘选择和精英选择、种群突变、染色体交叉、基因突变、量子旋转更新。当迭代次数达到最大迭代次数时,停止迭代并输出最优个体。

3.2.1 转盘选择和精英选择

选择操作模拟自然界“优胜劣汰”的生存法则,自适应能力强的个体越有可能存活下来。转盘选择是一种比例选择方法,个体被选中的概率与其自适应能力的大小成正比。转盘选择的作用是根据当前种群迭代产生新的种群,新的种群中较优个体比重增多,同时留存部分较差个体,保障了种群的多样性。为避免陷入多目标函数的局部最优值,采用下式描述转盘选择中个体在种群中的自适应能力:

$$G_i = (0.5 + \lambda) \frac{F_{c,i}}{\sum_{i=1}^{N_p} F_{c,i}} + (0.5 - \lambda) \frac{F_{d,i}}{\sum_{i=1}^{N_p} F_{d,i}} \quad (11)$$

式中: λ 为零均值均方根为 δ 的高斯白噪声,文中 δ 的选取和遗传的代数 η 有关,如下式所示:

$$\delta(\eta) = e^{-\frac{\eta-1}{20}} \quad (12)$$

转盘选择可能导致适应度高的个体被淘汰,为了避免这种情况,在转盘选择后加入精英选择^[12]。精英种群为历史群落中更新保留的最优个体,其种群大小远小于普通种群。从转盘选择产生的新群落和精英群落中,优先选取少许最优个体加入新的群落,避免种群的退化。转盘选择和精英选择相结合,保证了种群向着更优的层次进化。

3.2.2 种群突变

若经过多代进化后,最优个体或者精英群落没有更新,可能陷入局部最优解,此时可以选择较大的交叉概率 P_c 和突变概率 P_{mm} , 增加种群的多样性,催化最优个体的产生。

3.2.3 染色体交叉

染色体交叉是两条染色体相互交叉重组形成新的染色体过程。按照事先设定的交叉概率 P_c , 从当前

种群选取一对染色体,可用下式表示:

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 & \alpha_5 & \dots & \alpha_{m \times B} \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \beta_4 & \beta_5 & \dots & \beta_{m \times B} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\Omega_2 = \begin{bmatrix} \alpha_1' & \alpha_2' & \alpha_3' & \alpha_4' & \alpha_5' & \dots & \alpha_{m \times B}' \\ \beta_1' & \beta_2' & \beta_3' & \beta_4' & \beta_5' & \dots & \beta_{m \times B}' \end{bmatrix} \quad (14)$$

文中随机选取两个交叉点,此时交换策略可能为交叉点前、两交叉点间和交叉点后三种情况的某些组合。下式为染色体 Ω_1 和染色体 Ω_2 在等位点 2 和等位点 4 两个等位点间交叉交换后产生新染色体 Ω_1' 和 Ω_2' :

$$\Omega_1' = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2' & \alpha_3' & \alpha_4 & \alpha_5 & \dots & \alpha_{m \times B} \\ \beta_1 & \beta_2' & \beta_3' & \beta_4 & \beta_5 & \dots & \beta_{m \times B} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\Omega_2' = \begin{bmatrix} \alpha_1' & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4' & \alpha_5' & \dots & \alpha_{m \times B}' \\ \beta_1' & \beta_2 & \beta_3 & \beta_4' & \beta_5' & \dots & \beta_{m \times B}' \end{bmatrix} \quad (16)$$

3.2.4 基因突变

按照事先设定的突变概率 P_m , 执行基因突变操作。对于量子遗传算法,基因突变可以直接将等位基因对换,突变点的选择根据染色体长度随意生成。假设突变点位置为 3, 染色体 Ω_1 经过突变操作可得 Ω_1' :

$$\Omega_1'' = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \beta_3 & \alpha_4 & \dots & \alpha_{m \times B} \\ \beta_1 & \beta_2 & \alpha_3 & \beta_4 & \dots & \beta_{m \times B} \end{bmatrix} \quad (17)$$

3.2.5 量子旋转更新

量子旋转用于更新量子比特概率幅值,使得量子多状态逐渐趋近于稳定的单一状态,即 $\|\alpha_i\|^2 \rightarrow 1$ 或者 $\|\alpha_i\|^2 \rightarrow 0$ 。常采用量子门更新量子个体,其公式可表示为^[13]:

$$\begin{bmatrix} \alpha_i' \\ \beta_i' \end{bmatrix} = U(\theta) \times \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: 旋转角度 $\theta_i = s(\alpha_i, \beta_i) \times \Delta\theta_i$, 其中 $s(\alpha_i, \beta_i)$ 是符号位; $\Delta\theta_i$ 是角度增量。旋转角度的取值如表 1 所示。

表 1 量子旋转更新查找表

Tab.1 Quantum rotation update lookup table

r_i	b_i	$F(r) < F(b)$	$\Delta\theta_i$	$s(\alpha_i, \beta_i)$			
				$\alpha_i\beta_i > 0$	$\alpha_i\beta_i < 0$	$\alpha_i = 0$	$\beta_i = 0$
0	0	False	0	0	0	0	0
0	0	True	0	0	0	0	0
0	1	False	0	0	0	0	0
0	1	True	0.05π	-1	+1	± 1	0
1	0	False	0.01π	-1	+1	± 1	0
1	0	True	0.025π	+1	-1	0	± 1
1	1	False	0.005π	+1	-1	0	± 1
1	1	True	0.025π	+1	-1	0	± 1

其中, b_i 是当前种群中最优个体 b 的量子编码, r_i 是当前种群个体 r 的量子编码。

4 仿真验证

文中选取 8~14 个光电二极管, 常用光电二极管的半视场角 ψ 为 $60^\circ\sim 70^\circ$ 。视场范围越大, 布局所需的光电二极管数量越少, 但视场范围的过大会存在精度降低和误判的风风险。一方面考虑到视场过大输出电流较小, 此时光电二极管等效电路中并联电阻分流不可忽略, 余弦效应拟合效果较差。另一方面, 地球反光的影响较大, 最多可达入射光总量的 20%~30%^[14], 视场角较大可能错判光电二极管是否被太阳光照射, 在视场范围留有一定裕量的情况下, 可以简单的认为当其输出电压小于 $\cos(\psi)$ 时, 光电二极管处于阴影区域。因此需要折中考虑光电二极管的半视场角大小。对于量子遗传算法参数选择, 种群大小 N_p 为 200, 精英种群 N_q 为 20, 最大迭代次数 100, 染色体交叉概率 $P_c=0.90$, 基因突变的概率 $P_m=0.10$, 种群灾变时染色体交叉概率 $P_{cc}=0.95$, 种群灾变时基因突变概率 $P_{mm}=0.3$ 。

多光电二极管的布局, 不仅要尽量增加太阳矢量可解的视场空间范围, 还要减少的无效视场空间区域。在给定不同数量和不同视场范围的光电二极管情况下, 本节讨论多光电二极管的布局的覆盖风险和均匀风险。首先, 以被少于 3 个光电二极管覆盖的离散点集在整个点集的比例表示多光电二极管覆盖风险, 如图 6 所示。从图中可以看出, 增加光电二极

管数量和增大光电二极管视场方位对覆盖风险均有所改善。图中两条曲线分别给定了覆盖风险少于 20%、10%、5%、2%的分界线。

均匀度描述传感器的分布相对均匀性, 即表现在布局效果上是减少较大的无效区域面积, 也可以表述为较大的无效连通区域被分散为多个小块。采用下式评价传感器分布的均匀性:

$$G(n, \psi) = \log\left(\sum_{i=1}^q g(A_i)^3 + 1\right) \quad (19)$$

式中: q 为无效连通区域 A_i 的数量; $g(A_i)$ 描述无效连通区域的面积, 该评价函数有一个性质:

$$g(A_x + A_y + \dots + A_z)^3 > g(A_x)^3 + g(A_y)^3 + \dots + g(A_z)^3 \quad (20)$$

即对一个无效区域分割为多块, 可以降低传感器布局的风险, 如图 7 所示。以最大无效区域的面积比例表示均匀风险, 图中曲线分别表示均匀风险为 6%、3%、1%的分界线。

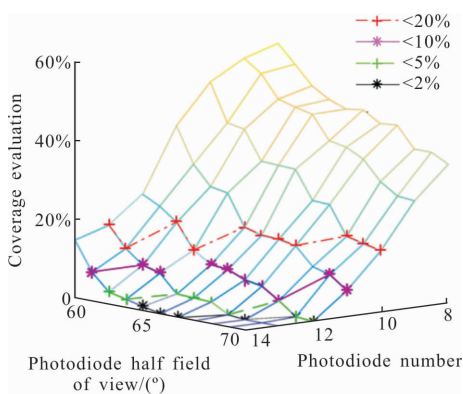


图 6 多光电二极管布局的覆盖情况

Fig.6 Coverage evaluation chart for multi-photodiode layout

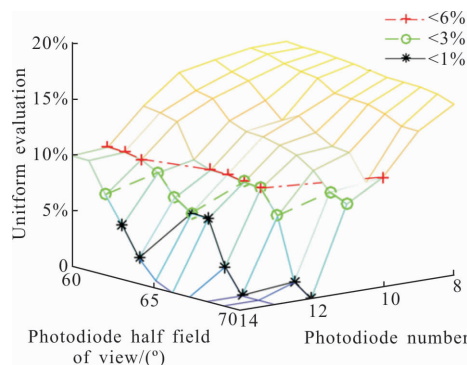


图 7 多光电二极管布局的均匀情况

Fig.7 Uniform evaluation map of multiple photodiode layout

当设计多光电二极管布局时, 需要综合考虑覆盖风险和均匀风险, 可以根据这两个指标选定光电二极管的数量和视场范围参数。若想实现基本无覆盖风险和均匀风险, 可以选用 12 个 70° 半视场角、13 个 68° 半视场角或者 14 个 66° 半视场角的光电二极管。通过仿真得出, 当给出视场范围为 $60^\circ\sim 70^\circ$ 时, 选择不同数量光电二极管的覆盖风险和均匀风险范围, 如表 2 所示。从表可以看出, 当选用 8 个光电二极管时, 覆盖风险达到 35%~57%, 均匀风险达到 34%~60%, 此时存在很大的隐患, 故选择光电二极管数量不应低于 8 个。

表 2 多光电二极管布局参数查找表

Tab.2 Multi-photodiode layout parameter lookup table

Number	Coverage risk	Uniform risk	Recommended layout scheme ($\theta/(\circ), \phi/(\circ)$)					
8	35%–57%	34%–60%	(149,–66)	(–103,–47)	(134,50)	(–111,–13)	(–85,32)	(78,–40)
			(106,4)	(0,90)				
9	27%–55%	18%–59%	(–68,48)	(75,–31)	(–41,–66)	(–65,11)	(103,–66)	(126,41)
			(–69,–31)	(96,19)	(0,90)			
10	15%–50%	5%–50%	(126,–27)	(–69,–13)	(–79,–38)	(–126,–22)	(149,–66)	(148,48)
			(90,–41)	(7,38)	(–18,75)	(0,90)		
11	6%–40%	2%–40%	(–162,–11)	(–43,38)	(33,–13)	(157,–14)	(–62,–50)	(95,–14)
			(–79,–11)	(37,–57)	(66,40)	(–177,31)	(0,90)	
12	0–24%	0–17%	(7,11)	(105,–31)	(137,–29)	(–33,–21)	(–150,40)	(–126,–22)
			(101,38)	(–18,75)	(23,–31)	(–162,–45)	(–79,–11)	(0,90)
			(54,–63)	(137,–29)	(–105,–21)	(167,–14)	(84,19)	(18,54)
13	0–17%	0–6%	(–143,57)	(–152,5)	(–39,–31)	(54,–11)	(–62,–50)	(–24,–19)
			(0,90)					
			(79,29)	(–60,19)	(136,22)	(–173,–11)	(–132,19)	(137,–38)
14	0–14%	0–5%	(–42,–40)	(70,–4)	(–162,–45)	(–18,58)	(43,–29)	(–101,–11)
			(–18,–27)	(0,90)				

5 结 论

文中提出了一种多光电二极管布局优化方法，将光电二极管布局问题转化为组合优化问题，并结合量子遗传算法求解这个 NP 难问题。另外，通过仿真分析布局的覆盖风险和均匀风险，建议选用 12~14 个光电二极管，此时基本达到无覆盖风险和均匀风险。同时当少于 8 个光电二极管时，将存在较大的风险。

参 考 文 献：

[1] O'Keefe S A, Schaub H. Consider-filter-based on-orbit coarse sun sensor calibration sensitivity [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2016, 40(5): 1300–1303.

[2] Jackson B, Carpenter B. Optimal placement of spacecraft sun sensors using stochastic optimization [C]//Aerospace Conference, IEEE, 2004, 6: 3916–3923.

[3] Heidt H, Puig-Suari J, Moore A, et al. CubeSat: A new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation[C]//14th Annual/USU Conference on Small Satellites, 2000: 113–116.

[4] O'Keefe S A, Schaub H. Sun-direction estimation using a partially underdetermined set of coarse sun sensors [J]. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 2014, 61(1): 85–106.

[5] Pita L C, San Roman S E, Giron-Sierra J M, et al. Getting more performance from INTA NanoSat –1B truncated pyramid Sun sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(6): 1867–1877.

[6] Springmann J C, Cutler J W. Optimization of directional sensor orientation with application to sun sensing[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2014, 37(3): 828–837.

[7] Nascimento A L, Simoes A R, de Carvalho F G M, et al. Automatic satellite sun sensors placement using multi-objective genetic algorithm[C]//2013 BRICS Congress on Computational

- Intelligence & 11th Brazilian Congress on Computational Intelligence (BRICS-CCI & CBIC), 2013: 402-408.
- [8] Han K H, Kim J H. Quantum-inspired evolutionary algorithm for a class of combinatorial optimization [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6 (6): 580-593.
- [9] Li B B, Wang L. A hybrid quantum-inspired genetic algorithm for multiobjective flow shop scheduling [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2007, 37(3): 576-591.
- [10] Teanby N A. An icosahedron-based method for even binning of globally distributed remote sensing data [J]. *Computers & Geosciences*, 2006, 32(9): 1442-1450.
- [11] Yu F X, Meng T, Han K, et al. Design and error analysis of pico-satellite sun sensor [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2007, 28(12): 1295-1299.
- [12] Xiao J, Yan Y P, Zhang J, et al. A quantum-inspired genetic algorithm for k-means clustering [J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(7): 4966-4973.
- [13] Li B B, Wang L. A hybrid quantum-inspired genetic algorithm for multiobjective flow shop scheduling [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2007, 37(3): 576-591.
- [14] Appel P. Attitude estimation from magnetometer and earth-albedo-corrected coarse sun sensor measurements [J]. *Acta Astronautica*, 2005, 56(1-2): 115-126.