基于贪婪算法的近空间平台区域覆盖优化设计

陈荣光 李春升 陈 杰 于 泽

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为了实现近空间多平台对任意区域的协同覆盖观测,提出了一种近空间区域性覆盖优化设计方法.该方法针对问题建立了 NP-hard 集合覆盖模型,应用随机贪婪算法设计并优化平台的位置参数以及采用的波位.随机贪婪方法从贪婪算法得到的一个解出发,随机移除一定比例的平台,再用贪婪策略加入若干个平台,改进了原始贪婪算法对优解空间搜索不足的缺点,因此提高了解的优度,同时也避免了应用遗传算法、蚁群算法等智能搜索算法在解决此类问题时对全部子集族庞大的存储和复杂的计算.利用 STK(Satellite Tool Kit)卫星仿真软件对四川汶川地区的优化设计结果进行了仿真,仿真结果给出了在 100% 覆盖的情况下平台的各参数信息,验证了该优化设计方法的有效性和智能性,为近空间区域覆盖设计提供了有力参考.

关 键 词: 合成孔径雷达; 集合理论; 贪婪算法

中图分类号: TN 95

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)05-0547-04

Optimization of near-space aerocraft track for regional coverage based on greedy algorithm

Chen Rongguang Li Chunsheng Chen Jie Yu Ze

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to covering any discretionary polygonal region, a novel method was proposed based on set covering problem model, which is a NP-hard problem. Random greedy algorithm strategy was applied in the method to achieve 100% regional coverage with minimum aerocrafts by designing and optimizing each aerocraft's track and beam position. Random greedy algorithm removed some aerocrafts from the solution of greedy algorithm randomly and added some new ones based on greedy strategy again. The method extended search range for more possible optimized solutions compared with traditional greedy algorithm. Simulation result on Wenchuan area shows good effectiveness and intelligence of the method. Reliable reference can be supplied for near-space regional coverage planning.

Key words: synthetic aperture radar; set theory; greedy algorithm

近空间是指介于普通航空器和航天器飞行空间之间的 20～100 km 的高空.近空间平台的概念自 2005 年被美国提出来以后越来越受到各国的重视[1]:与卫星相比,近空间平台具有效费比高,机动性好,有效载荷技术难度小,易于维护的优势;与传统的飞机相比,近空间平台的持续工作时间更长,覆盖范围更广,生存能力更强.综合以上两方面优势,近空间平台非常适用于区域性的短期或长期监测,如机动部署区域侦查、临时通信中继补充、国家沿海长期防御监视等应用[2].

区域性覆盖设计虽然在卫星星座设计的研究层面上已经取得了一些成果,但是针对近空间平台覆盖设计的研究还很少.近空间平台由于没有固定的运行轨道,可以任意角度、任意位置起飞而

收稿日期: 2008-08-10

作者简介: 陈荣光(1983—),男,辽宁辽阳人,硕士生,RongguangChen@gmail.com.

投入使用,因此数学上的约束很少,增加了设计的难度.

本文所要求解的优化问题是一个NP难问题,即在有限多项式时间内无法找到一个有效的方法能够一定得到它的最优解[3-4],因此本文选取了贪婪算法来进行设计,放弃了对全局最优解的搜索[5-6],而通过加入随机跳坑策略来弥补贪婪算法的不足,增加解的搜索空间以优化设计结果.从而避开了应用遗传算法和蚁群算法等智能算法解决集合覆盖问题时需要事先知道全部子集族的难点.

本文以典型的近空间平台——高空飞艇为研究对象,针对条带SAR(Synthetic Aperture Radar)载荷的情况进行覆盖设计分析,首先建立了多边形区域覆盖设计问题的模型,然后定义了判断点被覆盖的准则,并给出了飞艇位置与地面照射点位置间的推导公式,在此基础上给出覆盖设计的方法.最后运用STK(Satellite Tool Kit)软件对汶川地区的覆盖设计结果进行了仿真,总结并提出了问题进一步的研究方向.

1 区域覆盖问题模型

在各种有关研究中,预覆盖区域通常都假设为由经纬度所限定的一个准方格[7-8],这显然降低了对局部区域定义的精确度,本文放宽了这一约束,针对任意多边形区域进行覆盖设计.

给定一个感兴趣的多边形观测区域Ω,见图1,设定一个网格划分精度φ,以区域覆盖的最大和最小经纬度为边界,以φ为单位进行均匀划分.保留包含在区域中的所有的离散点,即得到了预观测区域内的所有点,设这一有限点集为X.若目标区域内某一点P被飞艇i的条带所覆盖,则令$p\in S_i$,可知集合S_i即为飞艇i覆盖的所有点的集合:

$$S_i=\{\text{第 } i \text{ 个飞艇覆盖到的点}\} \tag{1}$$

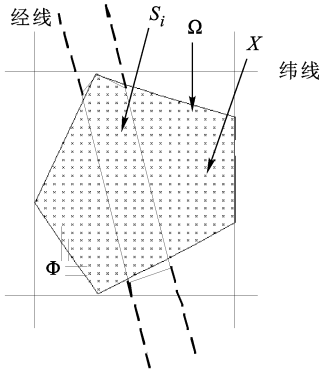


图1 集合对应示意图

显然,这样的集合S_i有无数个,且每个S_i都是X的一个子集,$S_i\in X$且$S_i\neq\varnothing$,$\varnothing$表示没有覆盖到任何点.如果存在由某些上述的S_i组成的一个子集族F,使得X中每一个元素至少属于F中的一个子集,则称子集族F覆盖了有限集X.也即如果目标区域内的每一个点都至少被一个飞艇所覆盖,则覆盖设计完成.所以区域覆盖问题转化为:求一个飞艇集合$F_{\min}$,使得$F_{\min}$含有最少的飞艇并满足$F_{\min}$覆盖有限集X.数学描述如下:

$$F_{\min}=\min\{F^*\mid F\text{ 覆盖了 }X\} \tag{2}$$

式中,F^*表示子集族F中含有的子集合数.

2 区域覆盖设计方法

2.1 覆盖准则

覆盖设计的关键是点被覆盖的判定准则,它直接影响覆盖设计的结果,因此有必要首先对其进行定义.在飞艇沿直线飞行的假设前提下,可以根据飞行轨迹上任意一点的位置信息来定义这条轨迹所覆盖的点.这是因为在给定飞行角和波位的前提下,可以根据飞艇位置精确计算出照射点的位置.式(3)、式(4)给出了由飞艇位置求照射点经纬度的计算公式,分别将波位近端视角和远端视角带入θ,可以求出地面近端照射点A和远端照射点B的经纬度,如图2所示.

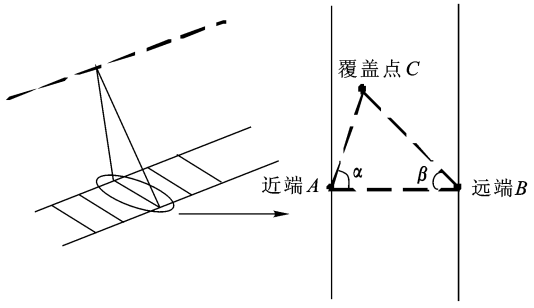


图2 覆盖准则示意图

$$P=X\pm\arcsin\left\{\left[\arcsin\left(\frac{R+H}{R}\times\sin\theta\right)-\theta\right]\times\sin\Theta\right\} \tag{3}$$

$$Q=Y\pm\arccos\left\{1-\frac{1-\cos\left[\arcsin\dfrac{\sin\delta\cos\Theta}{\cos[\arcsin(\sin\delta\cdot\sin\Theta)]}\right]}{\cos^2 Y}\right\} \tag{4}$$

式中,X为飞艇的纬度;Y为飞艇的经度;P为照射点的纬度;Q为照射点的经度的经度;θ为SAR侧视角,即与波位选择有关;Θ为飞行角,定义为

飞艇飞行方向所在平面与纬线所在大圆平面的夹角. H 为飞艇高度,R 为地球半径.

若区域中某一点 C 在平面 ABC 内满足式(5),则点 C 在地球表面上一定被限制在以 AB 为边界的观测带中,此时则认为该点被覆盖.

$$\left.\begin{aligned}\alpha &\leqslant \frac{\pi}{2}\\ \beta &\leqslant \frac{\pi}{2}\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

其中

$$\left.\begin{aligned}\alpha &= \arccos\left(\frac{|AC|^2+|AB|^2-|BC|^2}{2|AC||AB|}\right)\\ \beta &= \arccos\left(\frac{|AB|^2+|BC|^2-|AC|^2}{2|BC||AB|}\right)\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

假设地球是一个标准球体,则地球表面任意两点的弦长计算公式为

$$|XY| = \sqrt{2R^2[1-\cos x_2\cos x_1\cos(y_2-y_1)-\sin x_2\sin x_1]} \tag{7}$$

式中,x_1,x_2 和 y_1,y_2 分别为两个点的纬度和经度.

2.2　覆盖设计

基于上一节提出的判断点被覆盖的准则,本文提出了一种随机贪婪覆盖设计方法,该方法应用随机跳坑策略增大贪婪算法解的搜索空间,以增加解的优度,从而实现优化设计的目的. 其简要流程如图 3 所示.

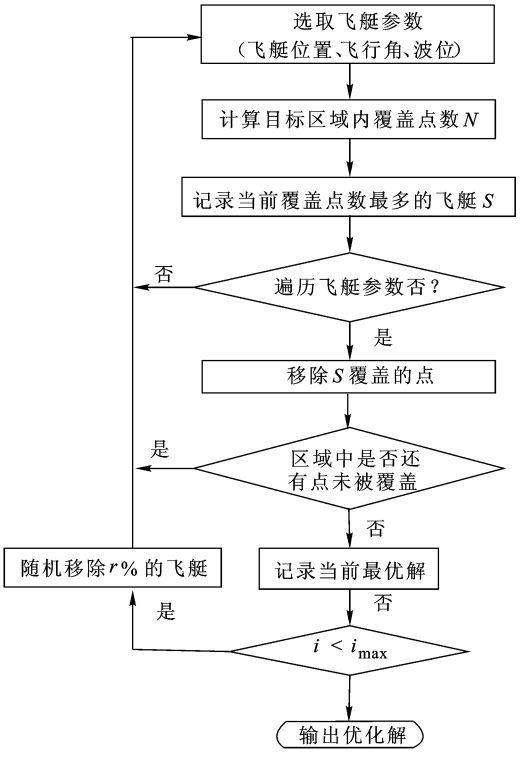


图 3　覆盖设计流程

1) 获得当前最好飞艇

遍历飞艇参数,根据覆盖准则,从 F 中选取一个当前情况下覆盖目标区域 X 中点最多的飞艇 S_k;

2) 获得贪婪算法的解

记下飞艇 S_k,然后把 S_k 所覆盖的点从 X 中移去,重复以上的操作直到 X 中所有的点都被覆盖. 得到解 $\boldsymbol{C}$;

3) 随机跳坑

用一个循环变量 i 来表示随机跳坑次数,$i_{\max}$ 表示最大跳坑次数. 若 $i<i_{\max}$,则从解 $\boldsymbol{C}$ 中随机移除 $r\%$ 的飞艇(本文选取 50%),这时便又有部分点没有被覆盖. 针对剩下的点仍然应用贪心算法进行设计,直到全部覆盖,得到新解 $\boldsymbol{D}$,若 $\boldsymbol{D}$ 中使用的飞艇数比 $\boldsymbol{C}$ 少,则用新解代替原来的解并进行下一次跳坑,直到 $i=i_{\max}$;

4) 输出最终优化解.

3　验证仿真

根据本文提出的方法,以我国四川汶川地区为例,假设需要针对地震灾区进行临时通信中继补充,需要覆盖一个面积约为 4×10^4 km^2 的五边形区域,共抽取出 335 个离散点. 用 C 语言程序分别实现加入随机策略前后的贪心算法. 由于 SAR 工作不受阴雨天气候和地震造成的空间尘土环境影响,可以全天候的工作,因此选用工作于条带模式的 SAR,照射带宽度可达 100～150 km,飞艇以 20 m/s 的速度飞行. 表 1 给出的是待选波位号,表 2 给出了单独应用贪婪算法的优化设计过程及结果,表 3 是在应用了 $i_{\max}=10$ 的随机贪婪策略后得到的优化结果.

表 1　待选波位表

波位号	中心视角/(°)	近端视角/(°)	远端视角/(°)
1	45.90	14.90	76.90
2	79.38	75.91	81.85
3	82.60	81.75	83.45
4	83.89	83.44	84.34

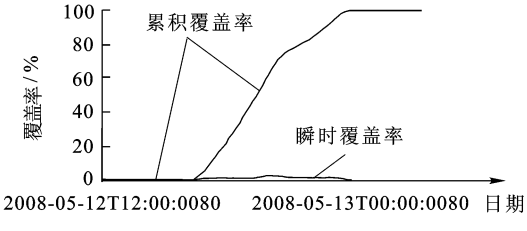
表 2　贪婪算法过程及结果

参数	贪婪次数		
	第 1 次	第 2 次	第 3 次
覆盖点数	213	76	46
飞行角/(°)	43	35	56
波位号	4	1	3
起点经度/(°)	98.310	100.324	96.936
起点纬度/(°)	29.819	28.379	28.963
终点经度/(°)	105.027	105.287	107.514
终点纬度/(°)	36.502	35.061	35.646

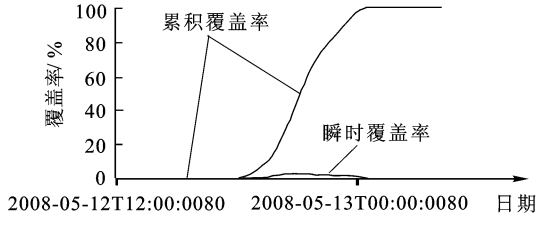
表3 应用 $i_{max}=10$ 随机跳坑策略的优化结果

参数	优化结果	
	飞艇1	飞艇2
覆盖点数	156	179
飞行角/(°)	56	56
波位号	1	3
起点经度/(°)	98.740	96.936
起点纬度/(°)	29.039	28.963
终点经度/(°)	109.326	107.514
终点纬度/(°)	35.722	35.646

图4a、图4b分别给出了两种情况下的覆盖百分比，可以看出，在经过了约12 h之后两种情况下的累积覆盖率均达到了100%. 由设计结果可以看出，当单独应用贪婪算法时，由于每次搜索一味地求最大点数，导致第一次贪婪后飞艇观测带位置居于区域的中心地带从而使原本可以用2架飞艇完全覆盖的区域最终用掉了3架飞艇. 应用随机跳坑策略后，随机搜索过程中覆盖点数较多且位置较好的飞艇被保留了下来，因而得到了更优的解. STK的二维仿真场景如图5所示.

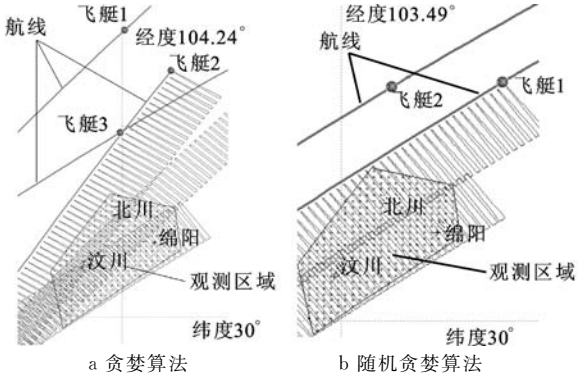


a 贪婪算法



b 随机贪婪算法

图4 目标区域覆盖百分比



a 贪婪算法 b 随机贪婪算法

图5 STK仿真结果

4 结 论

本文针对近空间多平台协同观测问题，提出了一种新的覆盖设计方法，该方法利用集合覆盖理论模型，通过随机贪婪算法进行了飞艇分布的优化设计，利用条带SAR实现对任意多边形区域的100%覆盖.

改进后的贪婪算法相对于其他智能算法在实现简单的同时，却能给出较为优化的结果，因此是在本类问题中更加可取的算法. 本文的设计方法同样适用于其他近空间平台以及载荷为光学照相机的情况，因而具有普遍性.

本文对近空间覆盖设计的研究还处于起步阶段，其中并未考虑覆盖重访时间以及多重覆盖等约束，因此还有待于继续研究并完善.

参考文献（References）

[1] Allen H E. The case for near space[J]. Aerospace America, 2006, 2, 31－34

[2] Galletti M, Krieger G, Börner T, et al. Concept design of a near space radar for tsunami detection[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona: IGARSS, 2007: 34－37

[3] 冯富宝. 集合覆盖问题研究[D]. 山东：山东大学计算机学院，2006
Feng Fubao. Research on set covering problem[D]. Shandong: School of Computer Science and Technology, Shandong University, 2006(in Chinese)

[4] Song S M, Lei Chi Meng, Wang Jiang. The end-effector angle and manipulator dexterous workspace[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1990, 112(3): 278－282

[5] 陈端兵，黄文奇. 一种求解集合覆盖问题的启发式算法[J]. 计算机科学，2007, 34(4): 133－135
Chen Duanbing, Huang Wenqi. A heuristic algorithm for set covering problem[J]. Computer Science, 2007, 34(4): 133－135(in Chinese)

[6] Zhang Pei, Wang Ronglong, Wu Chongguang, et al. An effective algorithm for the minimum set cover problem[C]// Proceedings of the Fifth International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Dalian: IEEE, 2006: 3032－3035

[7] 王瑞，马兴瑞，李明. 采用遗传算法进行区域卫星星座优化设计[J]. 宇航学报，2002, 23(3): 24－28
Wang Rui, Ma Xingrui, Li Ming. Opertimizaition of regional coverage satellite constellations by genetic algorithm[J]. Journal of Astronautics, 2002, 23(3): 24－28(in Chinese)

[8] Xie Kai, Yang Zhengbin, Huang Zhitao, et al. LEO space-based radar constellation design using a genetic algorithm [C]// International Conference on Radar. Changsha: IEEE, 2006: 1－4