

# 基于稳态遗传算法的间歇式覆盖天基雷达星座优化设计\*

范 丽<sup>1</sup> 张育林<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院 湖南 长沙 410073; 2. 东风航天中心 甘肃 酒泉 732750)

**摘 要** 针对天基雷达星座的构型优化设计,建立了能够反映星座重要工作性能的单双基地间歇式覆盖模型、星间链路模型、双基地雷达的动目标检测模型,得到了低轨道卫星星座星间链路判断准则,给出了统计评价特性和综合评估指标体系。在此基础上,建立星座设计的优化模型,采用基于可行解搜索法的协同演化遗传算法并融入稳态遗传进化策略,有效地处理带有复杂计算的目标函数和约束条件的星座优化问题,计算分析实例表明利用该方法进行星座设计是非常有效的。

**关键词** 星座;天基雷达;星间链路;双基地雷达;优化设计;遗传算法

中图分类号:V412.41;TN953 文献标识码:A

## Optimization Design of Discontinuous Coverage Space-based Radar Constellations via Steady State Genetic Algorithm

FAN Li<sup>1</sup> ZHANG Yu-lin<sup>2</sup>

(1. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Dongfeng Space Center, Jiuquan 732750, China)

**Abstract** A steady state genetic algorithm which can deal with several criterion functions was applied to the design optimization of Space Based Radar (SBR) satellite constellations. The discontinuous coverage model, inter-satellite links geometry model and bistatic moving target detection geometry model, which can describe the working properties of the SBR constellations, were developed. Then, the statistic evaluation and comprehensive evaluation indices were put forward, and the design optimization model was established. According to the particularities of this problem, steady state co-evolutionary genetic algorithm on the basis of searching in feasible solutions was used to deal with the design optimization problem. Finally, several design examples were presented, showing that the method is effective.

**Key words** constellations; SBR; inter-satellite links; bistatic radar; design optimization; genetic algorithm

天基雷达星座通过将多颗雷达卫星组网实现预警和监视功能,由于卫星视场范围<sup>[1]</sup>、星座成本等条件的约束,对于天基雷达这类军用卫星星座而言,采用以一定时间间隔重访的间歇式覆盖星座比较合理。同时,对于应用于预警和监视的军用卫星星座的设计,应该考虑星间链路的可构性及其性能。此外,对于天基雷达星座而言,对重点威胁区域辅之以双基地的工作模式,能够有效提高对移动目标的探测能力。

在天基雷达星座的优化设计中,受空间几何构型影响的星座性能分析计算开销很大,且难以获得目标和约束函数的梯度信息,设计变量离散连续混合,因此难以采用基于数值分析的算法进行求解,需要借助于现代启发式优化方法,如遗传算法等。传统上利用遗传算法进行星座构型优化设计时,一般仅以星座的覆盖特性作为优化目标<sup>[2-3]</sup>,较少考虑星座的其他性能要求,事实上,星座设计是一个受多方面因素制约的复杂优化问题。因此,本文在天基雷达星座构型优化设计中采用能够有效处理多个约束条件的遗传算法,该方法突破了传统几何方法以及点数字仿真枚举法的局限,能够有效地平衡约束条件处理和计算开销。

\* 收稿日期 2005 - 06 - 30

基金项目:十五 国家部委基金项目(4132001001)

作者简介:范丽(1977-),女,博士生。

# 1 天基雷达星座性能分析

## 1.1 基于 AHP 的天基雷达星座覆盖特性评价指标

考虑反映天基雷达星座的覆盖特性的三个指标,即最大覆盖间隙也即最大重访时间、平均响应时间和前向散射增强区双基地雷达覆盖时间,采用这三个指标的归一化加权值作为星座特性的评价函数。同时,考虑到不同纬度地区战略重要性以及预警时间要求的不同,按重要性将北半球(全球)划分为若干个纬度带,按照相对重要性给出权值。

天基雷达星座的覆盖特性评价指标描述如下:

$$COV(\xi) = \sum_{i=1}^n wg_i GM_i(\xi) + \sum_{i=1}^n wr_i TR_i(\xi) + \sum_{i=1}^n wb_i TB_i(\xi) \quad (1)$$

式中,  $\xi$ ——设计参数向量;  $GM_i$ ——描述纬度带  $i$  平均最大覆盖间隙的归一化指标;  $TR_i$ ——描述纬度带  $i$  平均重访时间的归一化指标;  $TB_i$ ——描述纬度带  $i$  增强双基地覆盖时间的归一化指标。

式(1)中的权值  $wg_i, wr_i, wb_i$  由层次分析法(AHP)确定,层次结构模型如图1所示。

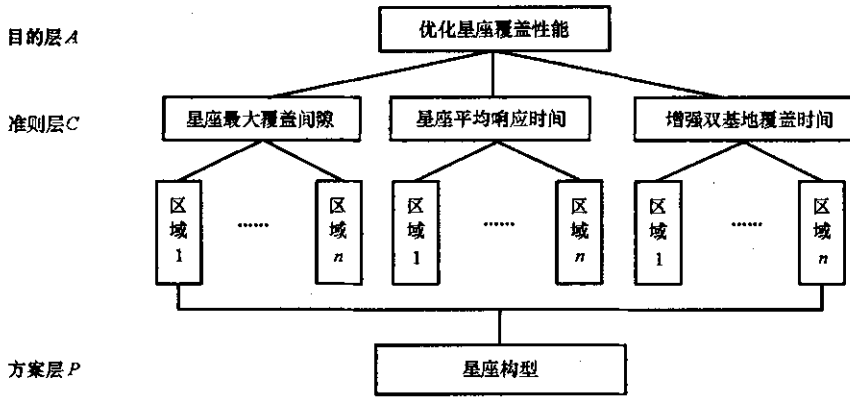


图1 间歇式星座覆盖性能优化层次结构模型

Fig.1 AHP model for optimization of coverage characteristics of discontinuous constellation

## 1.2 星间链路性能分析

由于星座中卫星受其固有运动规律限制,并不是所有的星座都可以构建星间链路,同时,由于受卫星之间相对运动特性的约束,不同构型的星座的星间链路的拓扑构型以及性能是不相同的。因此,星间链路的设计和分析在进行星座设计阶段就必须予以考虑。受成本的限制,低轨道预警和监视卫星星座中的卫星数目都较少( $< 30$ 颗),这样的星座的星间链路较为特殊,与已有的星座如铱星星座的星间链路有很大的差别。

两颗卫星可以构建星间链路的条件为

$$h_i > Re + h_{atm} \quad \text{且} \quad \begin{cases} \varphi_s < \varphi_{ant} \\ \theta_s < \theta_{ant} \end{cases}$$

其中,  $h_i$  为两卫星视线到地心的距离,  $h_a$  为避免穿越大气造成信号衰减的最小高度;  $\varphi_s, \theta_s$  为卫星星间链路在卫星坐标系下的方位角和高低角;  $\varphi_{ant}$  为星上天线可以提供的方位向和距离向波束扫描角度。

假设星座构型为  $N/P/R$  (卫星总数/轨道平面数/相位因子),每平面上的卫星数目为  $S$ ,下面依据1号卫星的链路数进行星座连通性讨论:

当1号卫星只有两条异轨道面的永久性星间链路时,假设与卫星1可构永久星间链路的第二个轨道面的卫星与1号卫星的升交点角距为  $Du$ ,而每个轨道面内相邻卫星的升交点角距差为  $\Delta u$ ,并令  $\Delta U = P \cdot Du$ 。

(1)当星座每个平面上的卫星数目  $S$  为偶数时,若  $\Delta U = 360n \pm \Delta u$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ),则星座是连通

的 ;

(2) 当  $S$  为奇数时 ,若  $\Delta U = 360n \pm k \cdot \Delta u$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ),  $k \in \{1, 2, \dots, S-1\}$  则星座是连通的。

当 1 号卫星有  $n$  ( $n \geq 4$ ) 条星间链路 ,则星座是连通的。

由于卫星之间有相对运动 ,为进行星间链路保持 ,必须进行天线跟踪。天线跟踪角度、角速度和角加速度决定了星间通信装置的复杂和困难程度。因此 ,这里采用机械天线跟踪对星体姿态的最大干扰力矩作为星座设计中评价星间链路性能的函数。干扰力矩描述为<sup>[6]</sup>

$$\{Q_d\} = \sum_{k=1}^M [J_{2k}^0 \{w'_{2k}\}] - \{F_{p0}\} \quad (2)$$

其中 , $Q_d$  表示天线运动引起的干扰力矩 , $w_{2k}$  表示天线运动的角速度 , $J_{2k}^0$  表示天线对中心体坐标系惯量耦合矩阵 , $F_{p0}$  表示作用在中心体上的分布力主矢列阵。

### 1.3 天基雷达星座双基地工作性能分析

合理设计星载双基地雷达的飞行几何 ,将有效抑制由平台运动引起的杂波。对于星座而言 ,整个星座对重点目标区域的多普勒频率扩展的统计平均特性 ,由星座的空间几何构型直接决定 ,可以作为衡量星座的双基地雷达工作特性的指标。

双基地雷达的多普勒频率为

$$f_d = -\frac{1}{\lambda} \frac{d}{dt} (R_T + R_R) = \frac{1}{\lambda} (q_T V_T + q_R V_R) \quad (3)$$

其中 , $V_i$  为发射平台和接收平台运动速度矢量 , $i \in \{T, R\}$ ;  $q_i$  为平台  $i$  到目标位置单位矢量 , $i \in \{T, R\}$ 。

平台到地面目标的距离矢量  $R_i$  为

$$R_i = s - r_i$$

多普勒频率相对于地面散射体目标位置的偏导数值为

$$\Delta f_d = \frac{1}{\lambda} \left[ \frac{1}{R_T} B_T \cdot V_T + \frac{1}{R_R} B_R \cdot V_R \right] \quad (4)$$

式中 , $B_i = I - q_i \cdot O_i^T$  , $\lambda$ ——雷达波长。

## 2 星座设计优化模型

通过上面对天基雷达星座分析 ,可以得到优化目标函数为

$$\min_{\xi \in S} f(\xi) = \min [COV(\xi) + CAS(\xi)] \quad (5)$$

$$CAS(\xi) = \lambda_1 \frac{N - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}} + \lambda_2 \frac{h - h_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}}$$

$CAS(\xi)$  为目标函数的附加约束项 ,主要用于约束卫星数目和轨道高度的取值 , $\lambda_1, \lambda_2$  为设计影响因子 ,其取值需要通过仿真试验比较目标函数中的各项对于目标函数值的贡献来确定。

约束条件为

- (1)  $\Delta f_d > \mu$  ;
- (2) 星座具有至少 2 链路拓扑构型的星间链路 ,且  $Q_d < \eta$  ;
- (3)  $6^\circ \leq \Psi \leq 70^\circ$  , $\Psi$  为雷达到目标的观测擦地角。

## 3 基于可行解搜索法的稳态遗传算法

采用可行解搜索法<sup>[4]</sup>解决星座优化的非线性约束问题 ,其主要思想是采用一定的策略修正非可行解并融入协同演化策略 :算法操纵两个不同的群体 ,即搜索群体和参考群体 ,搜索群体包含可行解和不可行解 ,参考群体中全部为可行解 ,搜索群体在参考群体中可行点的作用下进行变迁。对于非线性约束问题 ,最优解往往位于约束边界处 ,如果仅在可行域内进行种群演化 ,搜索到最优解的效率较低 ,因此引入参考群体来修正搜索群体中的不可行解 ,就有可能更有效地逼近最优解。算法的关键在于如何利用

参考群体修正不可行解。

该算法在处理搜索群体  $P_s$  和参考群体  $P_r$  时是不对称的,即在每一代都对  $P_s$  实行选择和遗传操作,而每隔  $R_t$  代才对参考群体  $P_r$  实行操作。对  $P_s$  的操作采用了稳态遗传算法策略<sup>[5]</sup>。此外,由于星座设计中的设计变量系离散连续型混合,所以在编码时采用了二进制和实数混合编码的方式,调整了杂交和变异演化算子。

#### 4 设计实例

按照战略意义的重要性,将北半球纬度带划分为三个区域,划分方法及用层次分析法求出的权矩阵如表 1 所示,设计变量及其取值范围如表 2 所示。

表 1 覆盖评价函数权值

Tab.1 Weights of coverage evaluation functions

	最大重访时间/s	平均响应时间/s	双基地覆盖时间/s	纬度/(°)
纬度带 1	0.406	0.165	0.085	15 - 30
纬度带 2	0.165	0.066	0.009	35 - 50
纬度带 3	0.066	0.027	0.009	5 - 10, 55 - 65

表 2 设计变量表

Tab.2 List of design variables

	符号	取值范围	变量类型
卫星数目	$N$	[ 20 30 ]	离散
轨道平面数	$P$	[ 10 2 ]	离散
相位因子	$F$	[ 9 0 ]	离散
轨道高度	$h/\text{km}$	[ 750 ,1000 ]	连续
轨道倾角	$i/(^\circ)$	[ 45 55 ]	连续

其他设计参数取值如表 3 所示。

表 3 设计参数取值

Tab.3 Values of design parameters

$\mu$	$\eta$	$\varphi_{ant}$	$\theta_{ant}$	$\lambda$
45/kms	$6.5 \times 10^{-5} \text{nm}$	$60^\circ$	$30^\circ$	3cm

演化参数取值如表 4 所示。

表 4 演化参数取值

Fig.4 Values of evolvement parameters

搜索群体	参考群体	复制概率	变异概率	参考群体 演化代频	最大演化代	替换概率
100	20	0.9	0.05	5	100	0.2

表 5 为设计影响因子不同取值时,得到的设计优化结果和星座的各项性能参数,其中各项覆盖性能参数均为重点地区覆盖特性。该结果给出了多种卫星数目和轨道高度的天基雷达星座方案,可以为天基雷达星座工程设计提供参考。

表 5 设计优化结果

Tab.5 Result of design optimization

设计影响因子		N/P/F	轨道	轨道	重访时间 (s)	响应时间 (s)	平均多普勒频率扩展 (1/kms)	双基地覆盖时间 (s)	链路	干扰力矩 (Nm)
$\lambda_1$	$\lambda_2$		高度 (km)	倾角 ( $^\circ$ )						
0.5	0.2	21/7/3	830	45	536	19.8	44.92	6895	2	6.414e-5
0.4	0.2	24/8/4	810	47.5	256	9.71	44.46	8214	2	6.491e-5
0.3	0.2	27/9/5	790	46	225	5.6	43.25	10251	2	6.401e-5
0.2	0.2	28/7/2	800	45	179	2.18	35.89	15982	2	6.495e-5
0.1	0.2	30/10/6	769	49	177	5.61	44.95	10750	2	6.481e-5

图 2 ~ 图 4 为设计影响因子为 0.4、0.2 时 随机运行一次的星座目标函数的收敛过程。从收敛历程可以看出,在星座的优化设计中,采用基于可行解稳态遗传算法可以在较短的时间内得到星座的全局近似最优解。

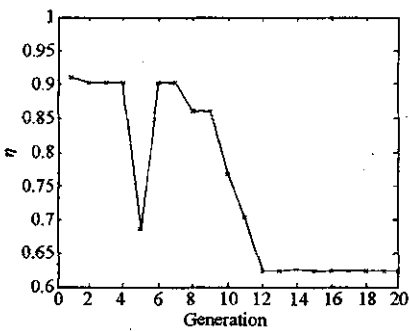


图 2 目标函数收敛历程  
Fig.2 Convergence process of objective function

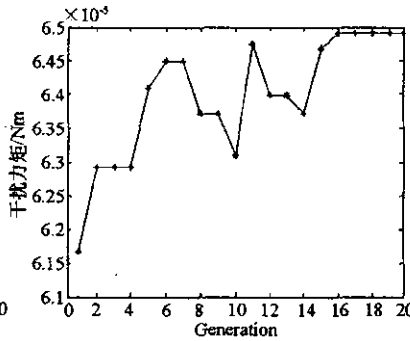


图 3 约束条件 1 收敛历程  
Fig.3 Convergence process of constrain 1

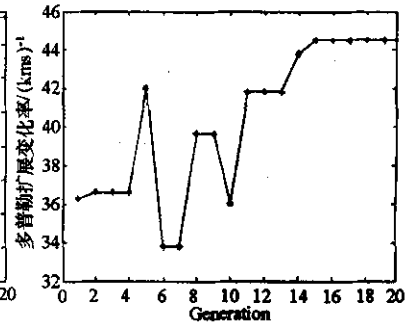


图 4 约束条件 2 收敛历程  
Fig.4 Convergence process of constrain 2

## 5 结论

算例分析结果表明,针对天基雷达所提出的星座优化设计方法,能够有效解决对于需要考虑多方面设计影响因素的星座设计问题,该方法既能考虑传统的星座优化设计所要求的分析计算,又能够考虑具有一定复杂度的工程性能分析模型,并以可接受的计算开销获得全局近似最优解。

## 参考文献:

[ 1 ] Tirpak A. The Space Based Radar Plan[ J ]. USA , Air Force Magazine , 200X ( 8 ).  
 [ 2 ] Ely T A , Crossley W A , Williams E A. Satellite Constellation Design for Zonal Coverage Using Genetic Algorithms[ R ]. AAS Paper 98 - 128 , 1998 .  
 [ 3 ] George E. Optimization of Satellite Constellations for Discontinuous Global Coverage via Genetic Algorithms[ R ]. AAS Paper 97 - 621 , 1997 .  
 [ 4 ] Michalewicz Z , Janikow C Z , Krawczyk J B. A Co-evolutionary Algorithm for Numerical Optimization Problems with Nonlinear Constraints[ A ]. Proc. of 1995 IEEE Int 'l. Conf. on Evolutionary Computation( ICEC '95 ] C ] , Perth , Australia , IEEE Press , 1995 .  
 [ 5 ] Syswerda G. Uniform Crossover in Genetic Algorithms[ A ]. In Proc. of the 3rd Int 'l. Conf. on Genetic Algorithms[ C ] , Morgan Kaufmann , Los Altos , 1989 .  
 [ 6 ] 张艳 ,张育林,具有星间链路的星座相位设计[ J ]. 宇航学报 , 2004 ( 2 ).

