

基于分布式优化的协同干扰任务分配研究

黄 郡¹, 单 洪¹, 满 毅¹, 陈 娟²

(1. 解放军电子工程学院网络工程系, 合肥 230037; 2. 解放军炮兵学院军事通信教研室, 合肥 230031)

摘 要: 为保证目标区域干扰覆盖和最小能量消耗的优化目标, 建立协同干扰任务分配模型。在分布式协同优化框架下, 将集中式任务分配问题, 转换为各个虚任务区内小规模分布式优化问题, 采用分解-协调优化模式和启发式遗传算法相结合的方法, 实现对各个子区域优化问题的二次迭代求解。仿真结果表明, 分布式协同优化方法能够有效降低协同干扰任务分配问题的求解规模, 避免“维数灾”, 具有可行性。

关键词: 协同干扰; 任务分配; 分布式协同优化; 分解-协调; 启发式遗传算法

Research on Collaborative Jamming Task Assignment Based on Distributed Optimization

HUANG Jun¹, SHAN Hong¹, MAN Yi¹, CHEN Juan²

(1. Department of Network Engineering, PLA Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

2. Military Communication Section, PLA Artillery Academy, Hefei 230031, China)

【Abstract】 To the objectives of guaranteeing covering quality of jamming region and using the least energy consumption, a task assignment model of collaborative jamming is proposed. A centralized task assignment optimization decision is decomposed into the decentralized optimization of several single virtual task regions under the framework of Distributed Collaborative Optimization(DCO), and a method of optimization mode based on decomposition-coordination and heuristic genetic algorithm is implemented to the solution for the decentralized optimization. Simulation results show that the DCO-based method can significantly reduce the size of task assignment optimization decision problems and avoid the problem of “curse of dimensionality”, and that it is a feasible method for collaborative jamming.

【Key words】 collaborative jamming; task assignment; Distributed Collaborative Optimization(DCO); decomposition-coordination; heuristic genetic algorithm

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.21.090

1 概述

随着信息技术和电子技术的飞速发展, 电子对抗手段不断更新。协同干扰技术即是在这种背景下产生的。它使用多个相互协作的小型化干扰机, 采用干扰机联网技术, 通过分布式网络结构进行数据交换, 以分布式干扰来破坏通信链路和雷达系统工作。与传统大功率远程干扰不同, 小型干扰机通过有人或无人驾驶飞机等工具, 大量地投掷到目标区内对方通信节点实施近距离干扰^[1], 具有节点数目众多、密集分布等特点。

小型干扰机通常采用高密度抛撒, 目标区域内存在大量冗余节点。如果不从全系统的角度对节点进行管理, 这种覆盖冗余将会给系统带来不必要的能量消耗。在现有的多干扰机多目标干扰任务分配研究成果中, 对能量消耗等因素考虑较少^[2]。并且由于干扰机数目较多, 在每次任务分配时, 需要优化的决策变量通常是高维的, 这使得集中式计算的负担很大, 甚至难以在有效的决策时间内得到满意解, 因此需要设计有效的分布式算法来求解较大规模的任务分配问题。本文针对上述问题, 以降低系统干扰能耗为目的, 提出一种基于分布式协同优化的多干扰机协同任务分配方法。

2 协同干扰任务分配问题建模

多干扰机协同干扰任务分配问题可以描述为: 目标区域内分布着 I 个干扰目标和 K 个干扰机, 干扰机能量有限且密集分布, 通过控制不同干扰机的干扰功率, 在保证干扰覆盖

目标区域内所有目标的前提下最小化系统的能量消耗。为简化模型分析, 对问题作如下假设: (1) 干扰目标保持静止, 位置已通过预先侦察确定; (2) 所有干扰机类型相同, 干扰功率可调, 各干扰机保持静止, 并且可通过 GPS 或某些局部算法准确定位; (3) 干扰机的干扰频段能够覆盖目标网络的工作频率, 干扰机和目标节点均使用全向天线。

本文干扰机能量消耗模型考虑干扰机在完成干扰任务时能量消耗, 干扰机在不施放干扰时能耗为 0。小型干扰机发射干扰信号的能量分档可调, 在不同干扰能量下, 干扰机具有不同有效干扰半径。设编号为 k 的小型干扰机 j_k 具有 M 档能量, 第 m 档干扰能量 EN_m 对应的有效干扰半径为 $r_k(m)$ 。由于能量消耗与有效干扰半径 r_k^2 存在一定的比例关系, 不妨令比例因子为 δ , 可得干扰机能耗值为 $E_k(r_k) = \delta r_k^2$ 。在目标区域内, 所有干扰机节点总的能量消耗可表示为:

$$E = \sum_{k=1}^K E_k(r_k) \quad (1)$$

根据文献[3]中干扰机对目标通信影响的计算方法, EN_m 与 $r_k(m)$ 之间具有如下关系:

$$\frac{EN_m}{r_k^2(m)} \leq \varepsilon \quad (2)$$

作者简介: 黄 郡(1983—), 男, 博士研究生, 主研方向: 无线网络安全; 单 洪, 教授、博士; 满 毅, 博士研究生; 陈 娟, 硕士
收稿日期: 2011-03-15 **E-mail:** huangjun123698745@126.com

其中, ε 为干扰机对目标通信影响的有效干扰强度阈值。显然, 干扰机节点的有效干扰范围是一个以 $r_k(m)$ 为半径的圆。当干扰机与目标的距离 d 超出干扰半径时, 目标通信受干扰的影响可忽略不计, 否则与 d^2 呈反比。因此, 小型干扰机 j_k 对目标的干扰强度(Jamming Intensity, JI)为:

$$J_{I_k} = \begin{cases} 0 & d > r_k(m) \\ \lambda \frac{r_k^2(m)}{d^2} \varepsilon & d \leq r_k(m) \end{cases} \quad (3)$$

其中, λ 是与干扰信号样式相关的参数, 反映了干扰信号对目标通信影响的有效性, 不失一般性, $\lambda=1$ 。由于小型干扰机干扰能力有限, 通常需要多个干扰机联合对目标发起协同干扰。当目标位于多个干扰机节点的公共干扰范围时, 则该目标的协同干扰强度(Coordinated Jamming Intensity, CJI)为这些干扰机节点在目标的干扰强度之和:

$$C_{JI} = \sum_{k=1}^{K_0} J_{I_k} = \sum_{k=1}^{K_0} \frac{r_k^2(m)}{d^2} \varepsilon \quad (4)$$

其中, K_0 是目标在有效干扰范围内的干扰机节点数目。只有当某目标处的干扰强度达到一个阈值 $J_{I_{sup}}$ 时, 该目标通信才能被压制, 即该目标被干扰覆盖。因此, 目标覆盖约束可表示为:

$$\sum_{k=1}^{K_0} J_{I_k} \geq J_{I_{sup}} \quad (5)$$

综上, 协同干扰任务分配模型如图 1 所示。显然, 任务分配问题抽象成为了一个多维多选择背包问题。

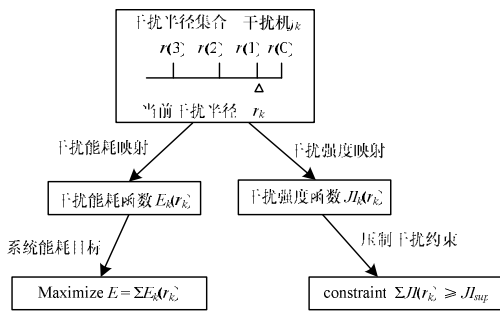


图1 协同干扰任务分配模型

3 分布式协同优化

前面针对多干扰机协同干扰区域覆盖问题的特点, 建立了类似于多维多选择背包问题的任务分配模型, 很明显该模型是集中式模型。这种集中式方式限制了协同干扰系统的规模, 如果系统十分复杂, 涉及的变量数目巨大, 则集中式求解方法的计算量和通信量将难以承受。而已有的 MMKP 问题分布式算法^[3-4]通常是针对具体环境设计的, 很难直接用于协同干扰任务分配。

考虑小型干扰机干扰能力有限, 只能对一定范围内的目标实施有效干扰, 本文引入虚任务区的概念来划分目标区域, 进而缩小任务分配问题的求解规模。虚任务区是指以目标节点位置为圆心, $r(M)$ 为半径的圆形区域。显然, 只有位于目标虚任务区内的干扰机节点才能对目标实施有效干扰。一个虚任务区中包含一个区域控制器, 负责本区域内干扰机的任务分配, 进一步将该问题抽象成一个多选择背包问题, 即: 为每个干扰机 j_k 选择一个有效干扰半径 r_k , 使得在满足对目标节点 i 压制干扰的前提下最小化能量消耗。就整个目标区域而言, 原先干扰覆盖多目标的多维多选择背包问题则转换为多个相对独立的干扰覆盖单目标的多选择背包子问题。由于虚任务区和干扰机的分布具有不确定性, 当相邻虚任务区之间相交时, 不同多选择背包问题之间具有一定的耦合关系,

需要在一定的协调策略下进行求解。

采用分布式协同优化技术^[5], 以分解-协调的系统观点综合考虑任务分配问题。不失一般性, 将协同干扰覆盖任务分配问题表示为如图 2 所示的 3 个相互关联的子模型。图 2 中 X_{sh} 为子模型之间的耦合变量, 即处于相交区域内的干扰机的有效干扰半径向量, X_f 为各子模型的私有变量, 即仅处于一个虚任务区内的干扰机的有效干扰半径向量。

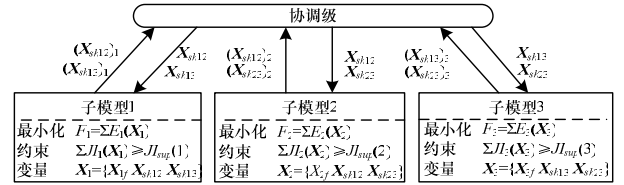


图2 分布式协同优化模式

各子优化问题的变量系统分别表示为如下的形式:

$$\begin{aligned} X_1 &= \{X_{1f}, X_{sh12}, X_{sh13}\} \\ X_2 &= \{X_{2f}, X_{sh12}, X_{sh23}\} \\ X_3 &= \{X_{3f}, X_{sh13}, X_{sh23}\} \end{aligned}$$

其中, X_{1f} , X_{2f} , X_{3f} 分别为各子优化模型的私有变量向量; X_{sh12} , X_{sh13} , X_{sh23} 为子优化问题耦合变量向量, 且满足 $X_{sh123} = X_{sh12} \cap X_{sh13} \cap X_{sh23}$ 。各子优化模型表示为:

$$\begin{aligned} \min F_i &= \sum E_i(X_i) \\ \text{s.t. } J_{I_i}(X_i) &\geq J_{I_{sup}}(i) \quad i=1,2,\dots,I \end{aligned}$$

假设上述子优化模型在独立优化时都能搜索到全局最优解分别为:

$$\begin{aligned} X_1^* &= \{X_{1f}^*, (X_{sh12})_1^*, (X_{sh13})_1^*\} \\ X_2^* &= \{X_{2f}^*, (X_{sh12})_2^*, (X_{sh23})_2^*\} \\ X_3^* &= \{X_{3f}^*, (X_{sh13})_3^*, (X_{sh23})_3^*\} \end{aligned}$$

相应的最优目标值分别为 F_1^* , F_2^* , F_3^* 。由于各子优化模型中耦合变量都朝着自身目标有利的方向变异, 它们在不同子优化模型中的值通常互不相等, 即 $(X_{sh12})_1^* \neq (X_{sh12})_2^*$, $(X_{sh13})_1^* \neq (X_{sh13})_3^*$, $(X_{sh23})_2^* \neq (X_{sh23})_3^*$ 。对于 X_{sh} 所对应的干扰机而言, 耦合变量不一致意味着该干扰机可能先后收到了来自多个区域控制器的不同任务值, 此时为了满足干扰覆盖所有目标的干扰强度约束, 干扰机需要将其有效干扰半径设置为其中最大的一个。当干扰机设置新协调值后, 需将新协调值反馈回区域控制器, 然后区域控制器以新协调值为常量, 在子目标函数下对独立变量进行二次优化。综上所述, 整个任务分配的求解及协调过程如下:

步骤 1 区域控制器优化求解虚任务区内任务分配问题, 得到 X_i^* , 通过干扰机网络向各个干扰机发送控制命令, 设置区域内干扰机有效干扰半径。

步骤 2 干扰机接收区域控制器的控制命令, 对有效干扰半径进行设置, 若一个干扰机收到来自多个区域控制器的不同任务值, 则取其中最大值, 并将协调值反馈回区域控制器。

步骤 3 区域控制器在收到干扰机反馈的协调值后, 以耦合变量的协调值为常量, 在子目标函数下求解独立变量。

步骤 4 区域控制器再次发送控制命令, 设置独立变量所对应干扰机的有效干扰半径。

步骤 5 独立变量对应的干扰机接收新的任务值, 设置新的任务值, 任务分配结束。

4 局部优化问题求解

在分布式协同优化求解过程中, 其中一个重要的问题是对每个虚任务区内任务分配的局部优化问题进行求解, 以获得虚任务区内干扰机有效干扰半径的控制输入。结合问题的启发性知识, 设计了一个启发式遗传算法求解虚任务区内的

目标覆盖任务分配问题。

染色体采用整数编码, 基因序号表示干扰机编号, 基因值表示干扰功率档值。按照干扰机距离目标远近对基因进行排序, 不同基因段采用不同的编码。干扰机距离目标较远, 干扰功率选择范围较小, 其对应的基因编码范围也较小。这样有利于缩小解空间规模, 增强算法优化性能。另外, 基于启发式算法中的贪婪策略, 算法对遗传操作中出现的不可行解进行修复, 对可行解则进一步修正。

为避免陷入局部最优, 算法设计了启发式扰动算子, 将距离目标较近的干扰机上的干扰任务向距离目标较远的干扰机上迁移。扰动算子保证当前解必须可行。具体步骤如下:

Step1 从种群 $P(t)$ 中部分复制高于平均适应度的个体, 构成测试种群 $Q(t)$ 。

Step2 对 $Q(t)$ 中的每个个体, 从 r_1 开始, 随机选择一个当前变量值大于 1 的基因座 r_k , 将该基因座上的基因值减 1, 同时增加其后基因座上的基因值, 保证该解继续可行, 生成 $\hat{Q}(t)$, 比较 $Q(t)$ 和 $\hat{Q}(t)$, 保留适应度较大的个体。

Step3 把替换后的个体返回到原种群中 $P(t)$ 中, 选择出下一世代种群 $P(t+1)$ 。

对于集中式优化, 算法与局部优化算法类似, 不同之处在于解空间对应整个目标区域中所有干扰机有效干扰半径的控制输入。限于篇幅, 算法细节不再详述。

5 仿真结果分析

以某型无线电通信干扰弹的性能数据^[6]为基础, 设置小型干扰机有效干扰半径参数集合分别为 $\{0, 350 \text{ m}, 1\ 050 \text{ m}, 1\ 750 \text{ m}\}$, 分别表示在不同档位干扰功率下的有效干扰半径, 其中, 0 表示当前干扰机关机, 干扰效果计算参考式(4)。设置目标覆盖门限值均为 50, 单元格长度为 $1\ 238 \text{ m}$ 。典型仿真运行场景如图 3 所示。

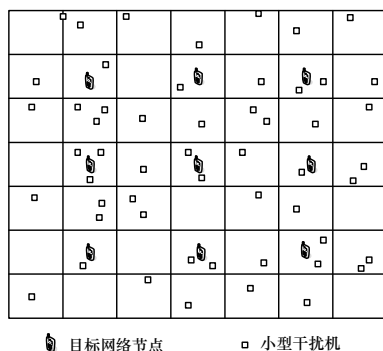


图 3 典型仿真运行场景示意图

图 4 给出了不同干扰覆盖冗余下, 分布式求解算法与集中式求解算法在优化性能上的对比。这里, 干扰覆盖冗余是指所有干扰机使用最高档位能量干扰时, 对区域目标的最小干扰强度超出覆盖阈值的部分。从图中可以看出, 使用优化算法消耗的能量最多不超过最大能量消耗的 30%, 这说明协同干扰任务分配的节能效果是显著的, 并且使用分布式优化算法得到的最小能量值小于使用集中式优化算法得到的最小能量值, 尤其在干扰覆盖冗余值取 45 时, 分布式优化算法求得的最小能量仅为集中式算法的 45.4%。这主要是因为整个区域干扰机数目增长导致解空间规模的增大, 在多维约束限制下, 集中式算法很难在有限进化代数下收敛到最优解或近似最优解。而分布式优化仅在虚任务区内, 解空间规模增大对算法性能影响不大, 并且干扰覆盖冗余的增大有利于扩充可行任务分配方案集, 子模型更易于找到与其他子模型存

在较小冲突或无冲突的方案, 进而减小不同子模型优化方案不一致而造成的优化目标损失。

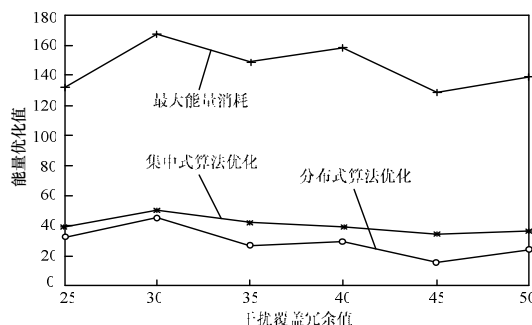


图 4 不同干扰覆盖冗余下 2 种算法能量优化值的对比

图 5 给出了不同干扰覆盖冗余下, 分布式求解算法与集中式求解算法在计算时间性能对比, 其中分布式求解算法使用虚任务区任务分配计算时间的最大值。从图中可以看出, 采用分布式协同优化求解所消耗的时间明显低于集中式求解, 这对于任务时效性较强的协同干扰来说是有意义的。另外, 当目标区域中部分目标干扰覆盖要求变化时, 采用分布式求解方法仅需在目标对应的虚任务区内重新任务分配, 因此, 具有更强的动态适应性。

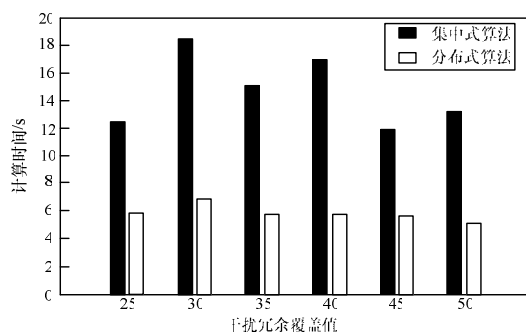


图 5 不同干扰覆盖冗余下 2 种算法计算时间的对比

6 结束语

本文提出了一种基于分布式协同优化的协同干扰任务分配方法, 实现了协同干扰任务分配决策计算的分散化。仿真结果表明, 分布式算法在能量优化值上优于集中式算法。另外, 分布式算法能够有效地减少优化问题的规模, 从而缩短优化决策的时间, 降低了任务分配在线计算的复杂性。

参考文献

- [1] 赵明, 杨小牛, 邹少丞, 等. 电子战技术与应用——通信对抗篇[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [2] Commander C W, Pardalos P M, Ryabchenko V, et al. The Wireless Network Jamming Problem[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2007, 14(4): 481-498.
- [3] Islam M I, Akbar M M. Heuristic Algorithm of the Multiple-choice Multidimensional Knapsack Problem(MMKP) for Cluster Computing[C]//Proc. of the 12th International Conference on Computers and Information Technology. [S. l.]: IEEE Press, 2009.
- [4] 宋海生, 宋海洲, 博仁毅. 求解多限制 0-1 背包问题的混合遗传算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(13): 4-7.
- [5] 薛彩军, 聂宏, 邱清盈. 分布式优化模式及其协调策略的研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(10): 19-24.
- [6] 邢立新, 高善清, 吴新明. 无线电通信干扰弹射击特点分析[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(4): 157-159.

