

## 基于任务效用最大化的多雷达协同任务规划算法

袁野<sup>\*①</sup> 杨剑<sup>②</sup> 刘辛雨<sup>①</sup> 易伟<sup>①</sup> 孔令讲<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(电子科技大学信息与通信工程学院 成都 611731)

<sup>②</sup>(火箭军工程大学导弹工程学院 西安 710025)

**摘要:** 该文针对多雷达协同场景下的多任务实时规划问题,提出了一种基于任务效用最大化的多雷达协同在线任务规划模型。该模型以任务效用函数最大化为目标将多雷达协同任务分配建模成一个基于整数规划的多变量混合优化问题;随后提出了启发式穷举搜索算法和基于凸松弛的两步解耦算法,可在多项式时间内完成了该NP难优化问题的求解,且分别在优化性能和计算效率方面有所侧重。仿真实验表明,相比于可找到最优解的穷举搜索算法,该文提出算法可有效降低任务规划问题复杂度,提升问题求解效率,以满足在线任务分配的实时性要求。

**关键词:** 多雷达协同探测; 任务规划; 任务效用; 最优化算法

中图分类号: TN958.92

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2023)03-0550-13

DOI: 10.12000/JR23013

**引用格式:** 袁野, 杨剑, 刘辛雨, 等. 基于任务效用最大化的多雷达协同任务规划算法[J]. 雷达学报, 2023, 12(3): 550-562. doi: 10.12000/JR23013.

**Reference format:** YUAN Ye, YANG Jian, LIU Xinyu, *et al.* Multiradar collaborative task planning based on task utility maximization[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(3): 550-562. doi: 10.12000/JR23013.

## Multiradar Collaborative Task Planning Based on Task Utility Maximization

YUAN Ye<sup>\*①</sup> YANG Jian<sup>②</sup> LIU Xinyu<sup>①</sup> YI Wei<sup>①</sup> KONG Lingjiang<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

<sup>②</sup>(College of Missile Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** A utility maximization-based multiradar online task planning algorithm aiming at the real-time multitask planning problem is proposed in this paper. Using the maximization of the task utility function as the objective, multiradar task planning is formulated as an integer programming-based mixed multivariable optimization problem. Then, two algorithms, namely heuristic greedy search and convex relaxation-based two-step decoupling are proposed to solve the resulting NP-hard optimization problem in polynomial time, respectively. Simulation experiments demonstrate that compared with the optimal exhaustive search algorithm, the proposed algorithms can effectively reduce the computing time or improve solution efficiency such that the real-time requirement of online task planning can be satisfied.

**Key words:** Multiradar collaborative detection; Task planning; Task utility; Optimization algorithms

收稿日期: 2023-02-03; 改回日期: 2023-03-23; 网络出版: 2023-04-11

\*通信作者: 袁野 ncepuyuan@163.com \*Corresponding Author: YUAN Ye, ncepuyuan@163.com

基金项目: 博士后创新人才支持计划(BX20220057), 国家自然科学基金(62231008, U19B2017), 中央高校基本科研业务费专项资金(ZYGX2020ZB029)

Foundation Items: China National Postdoctoral Program for Innovative Talents (BX20220057), The National Natural Science Foundation of China (62231008, U19B2017), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (ZYGX2020ZB029)

责任主编: 严俊坤 Corresponding Editor: YAN Junkun

## 1 引言

利用空间上广域分布的多雷达节点协同工作, 可从不同频段、不同时空、不同极化方式下充分挖掘探测目标雷达散射截面积(Radar Cross Section, RCS)的多样性<sup>[1-3]</sup>, 显著提升隐身、微弱等目标的探测性能。同时, 多雷达系统分布式探测构型具备极强的抗干扰能力, 在复杂电磁场景下拥有更强的生存力<sup>[4,5]</sup>。鉴于多雷达协同在探测和对抗方面的效能得益, 围绕多雷达协同的相关研究逐渐成为当前雷达信号处理领域的前沿和热点问题。

随着相控阵、频控阵、数字阵列等雷达体制的出现和逐步成熟, 多功能雷达的概念和相关研究也得以发展。多功能雷达能够通过调整其工作模式和工作参数实现不同的探测功能, 以完成搜索、跟踪、确认、制导等多元化的作战任务, 例如: 相控阵雷达能够以边扫描边跟踪(Track While Scan, TWS)、搜索加跟踪(Track and Search, TAS)<sup>[6]</sup>两种不同模式实现不同数据率下的目标搜索和跟踪任务。在此背景下, 如何保证多功能雷达系统在复杂多元化的任务场景中的适应性, 以提升其任务执行效能(如雷达数据率<sup>[7]</sup>、探测威力<sup>[2]</sup>、跟踪精度<sup>[8,9]</sup>、低截获概率<sup>[10]</sup>等不同类型任务指标), 成为当前多功能雷达、多雷达协同探测等领域研究的热门问题。围绕此需求, 现有工作主要从雷达系统的多任务动态规划和资源优化调度两个角度展开相关问题研究。其中, 多任务动态规划主要从宏观任务场景出发, 解决多个探测任务如何在多个雷达间合理分配执行, 或如何规化多个任务在单个雷达节点的执行先后顺序的问题, 以提升多任务的综合执行效率<sup>[11]</sup>(如雷达数据率、任务执行耗时等); 相较而言, 雷达系统资源优化调度则从微观的发射资源粒度级出发, 旨在结合具体探测任务, 通过优化雷达系统资源(如节点位置<sup>[12]</sup>、发射功率<sup>[13-16]</sup>、驻留时间<sup>[17,18]</sup>、工作带宽<sup>[19]</sup>等), 以提升特定探测任务性能(如检测概率、定位误差、跟踪精度等)或达到预设的探测任务性能, 最小化系统资源消耗。

多任务动态规划问题的核心在于如何实现雷达节点执行任务的合理、高效分配, 并完成雷达节点任务执行线程的优化排布, 以提升多任务的执行效率或尽量降低任务执行延迟。近年来, 多任务动态规划也依托多功能雷达系统、相控阵雷达等, 逐步完善了其相关理论算法研究<sup>[11,20-24]</sup>。朱希同等人<sup>[21]</sup>针对天波超视距雷达探测场景, 提出了一种基于综合优先级最大化的雷达波位调度算法。根据任务属性和工作场景确定了任务的最终优先级, 然后根据任务优先级完成了雷达波位扫描顺序的安

排; 围绕相控阵雷达任务分配场景, 赵宇等人<sup>[22]</sup>提出了一种基于任务执行时间偏移最小的任务规划策略。通过最小化雷达的期望执行时间和实际执行时间偏移量与任务优化级的加权求和, 相控阵雷达任务规划问题被建模成一个数学优化问题。赵宇等人随后分析了最优解存在条件, 并给出最优解解析的求解方案; 同样针对相控阵雷达多任务规划, 展红英<sup>[23]</sup>结合了遗传和粒子群算法, 实现了任务规划问题的求解。

上述研究证明了雷达任务动态分配算法在提升任务执行效率、降低执行等待延时等方面具有显著效果。但当前大部分多任务动态规划研究还基于单个雷达节点任务场景开展, 鲜见针对一般化的多雷达、多任务场景的在线探测任务分配相关研究。而在多雷达场景下, 任务动态规划算法除了需要解决原本单雷达场景下的任务执行线程优化排布问题, 在此之前, 还需要完成“探测任务-雷达节点”的优化分配, 其对应的数学模型更为复杂, 优化参量的维度也随之增加, 是一个更复杂且更具挑战性的问题。而如前所述, 多雷达协同是未来雷达目标探测形态的一种重要发展趋势。实际场景中, 多雷达协同系统通常也需要同时执行多项探测任务。因此, 如何在多雷达节点间完成多探测任务的合理分配规划成为雷达目标探测领域一个亟待解决的前沿问题。

本文针对多雷达协同场景下的多任务在线分配需求, 提出了一种基于任务效用最大化的多雷达协同在线任务分配算法。以探测任务的性能和任务执行的等待时间分别构建了任务质量函数和任务效率函数, 并以其加权求和完成了任务效用函数的建模; 通过最大化任务效用函数, 多雷达协同任务分配被建模成了一个整数规划的混合变量优化问题; 随后, 本文提出了两种算法, 包括启发式贪婪算法和基于凸松弛的两步解耦算法(Convex Relaxation-based Two-Step Decoupling, CRTSD)实现了该问题的高效求解, 相较而言, 前者具备更快的计算效率而后者具备更高的优化精度; 最后, 通过仿真实验验证了提出方法的有效性。

## 2 多雷达协同任务分配系统模型

考虑多雷达系统协同执行多个探测任务的场景, 系统中各节点以统一的时序周期工作, 并在周期开始前进行协同任务分配, 本文则主要解决多雷达系统单个周期探测任务的合理分配和执行问题。

在某一特定探测周期开始时, 考虑由 $N$  ( $N > 1$ )部雷达节点组成的协同探测系统收到 $Q$ 个探测任务执行请求, 每个任务所在的位置 $(x^q, y^q)$  ( $q = 1, 2, \dots, Q$ )

各不相同。探测系统需要在每部雷达任务执行能力有限情况下,将这 $Q$ 个探测任务优化分配给 $N$ 部雷达执行,以实现多任务全局探测效能最优。

数学上讲,为表示任务-雷达的分配结果以及各部雷达对分配任务的执行顺序,定义 $\mathbb{Q} = \text{Perm}\{1, 2, \dots, Q\}$ 为上述 $Q$ 个任务序号的任一排列,则可以使用 $\mathbf{U}|_{\mathbb{Q}} \in \mathbb{Z}^{N \times Q}$ 表示在特定任务排列 $\mathbb{Q}$ 下,每个任务的分配结果:

$$\mathbf{U}|_{\mathbb{Q}} = \begin{bmatrix} u_{1|\mathbb{Q}}^1 & u_{1|\mathbb{Q}}^2 & \cdots & u_{1|\mathbb{Q}}^Q \\ u_{2|\mathbb{Q}}^1 & u_{2|\mathbb{Q}}^2 & \cdots & u_{2|\mathbb{Q}}^Q \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{N|\mathbb{Q}}^1 & u_{N|\mathbb{Q}}^2 & \cdots & u_{N|\mathbb{Q}}^Q \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,元素 $u_{n|\mathbb{Q}}^q$  ( $n = 1, 2, \dots, N, q = 1, 2, \dots, Q$ )为一个0-1变量:

$$u_{n|\mathbb{Q}}^q = \begin{cases} 1, & \text{雷达}n\text{执行}\mathbb{Q}\text{中的第}q\text{个任务} \\ 0, & \text{雷达}n\text{不执行}\mathbb{Q}\text{中的第}q\text{个任务} \end{cases} \quad (2)$$

为了更形象地解释任务排列 $\mathbb{Q}$ 和任务分配 $\mathbf{U}|_{\mathbb{Q}}$ 变量对整个任务分配结果的影响,图1给出了两部雷达分配5个任务的场景,其中任务1、任务2、任务4分配给雷达1执行,任务3、任务5分配给雷达2执行。可以发现,在两种不同的任务排列 $\mathbb{Q}$ 情况下,即使任务分配结果 $\mathbf{U}|_{\mathbb{Q}}$ 相同,雷达执行任务顺序是不同的。因此,多雷达系统的任务分配和执行过程需要利用任务排列 $\mathbb{Q}$ 和任务分配 $\mathbf{U}|_{\mathbb{Q}}$ 两个变量表征。

为方便后续表述,利用向量 $\mathbf{u}^q = [u_{1|\mathbb{Q}}^q \ u_{2|\mathbb{Q}}^q \ \cdots \ u_{N|\mathbb{Q}}^q]^T$ 表示 $\mathbf{U}|_{\mathbb{Q}}$ 第 $q$ 列元素构成的向量,其中, $[\cdot]^T$ 表示向量/矩阵的转置操作;利用 $\mathbf{u}_n = [u_{n|\mathbb{Q}}^1 \ u_{n|\mathbb{Q}}^2 \ \cdots \ u_{n|\mathbb{Q}}^Q]^T$ 表示 $\mathbf{U}|_{\mathbb{Q}}$ 第 $n$ 行元素构成的向量。由此,第 $n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ )部雷达节点根据 $\mathbf{u}_n$ 来确定是否执行任务以及任务执行的先后顺序。

## 2.1 探测任务属性

多功能雷达通常需要执行目标搜索、跟踪、确认、制导等多类型任务<sup>[21]</sup>,每项待执行任务通常拥有其任务重要性、执行代价、实时性要求等特征。在任务规划问题模型中,探测任务属性主要用于描述各项探测任务的上述特征,以满足多任务间多元化的探测资源需求。本文采用任务位置 $(x^q, y^q)$ 、任务重要性 $\rho^q$ 和任务耗时 $t^q$ 来描述每项探测任务的基本属性。

$$\boldsymbol{\nu}_{\text{Prop}}^q = \{(x^q, y^q), \rho^q, t^q\}, q = 1, 2, \dots, Q \quad (3)$$

其中, $0 \leq \rho^q \leq 1$ 表示第 $q$ 个探测任务的重要性,任务重要性用于表征该项任务执行的优先级。优先级越高任务的重要性 $\rho^q$ 值越大; $t^q$ 表示第 $q$ 个探测任务的执行耗时,表示承接该项任务时,雷达节点需要付出的探测资源代价。

## 2.2 多雷达任务分配模型

在 $N$ 部雷达协同执行上述 $Q$ 个探测任务时,每部雷达需消耗部分探测时间资源用于执行分配到的任务。考虑每部雷达的时间资源有限,此时存在以下雷达节点探测能力约束:

$$\mathbf{1}_n^T \mathbf{t} \leq t_{n, \max} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{t} = [t^1 \ t^2 \ \cdots \ t^Q]^T$ 为任务执行耗时向量; $t_{n, \max}$ 为雷达节点 $n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ )的最大可用时间资源。为简化问题建模,本文假设一个探测任务同时只被一个雷达节点选取并执行<sup>1</sup>。因此,单个任务被选中次数以及所有雷达执行任务的次数存在以下约束:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{1}^T \mathbf{u}^q &\leq 1 \\ \mathbf{1}^T \mathbf{U}|_{\mathbb{Q}} \mathbf{1} &\leq Q \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

多雷达任务分配问题的本质就是在式(4)和式(5)

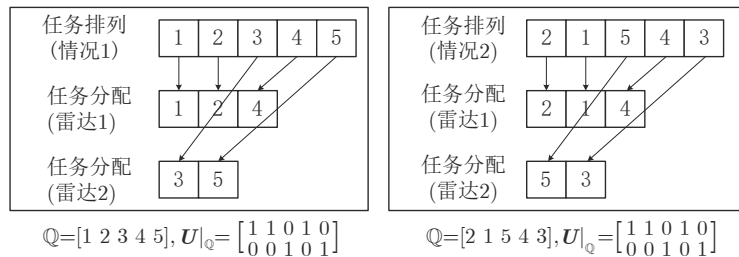


图 1 任务排列与任务分配概念解释

Fig. 1 An illustration of the concepts for task arrangement and task scheduling

<sup>1</sup> 若要消除该假设,可通过将一个待执行任务 $q$ 拆分成在同一个位置的多个子任务。例如:可将某项任务 $\boldsymbol{\nu}_{\text{Prop}}^q = \{(x^q, y^q), \rho^q, t^q\}$ ,拆分成 $k$ 个子任务 $\boldsymbol{\nu}_{\text{Sub-Prop}}^1, \boldsymbol{\nu}_{\text{Sub-Prop}}^2, \dots, \boldsymbol{\nu}_{\text{Sub-Prop}}^k$ ,其中 $\boldsymbol{\nu}_{\text{Sub-Prop}}^k = \{(x^q, y^q), \rho^q, t^k\}, \sum t^k = t^q$ 。

的约束下，将 $Q$ 个探测任务在线分配给 $N$ 部雷达，同时每部雷达将分得的任务在其任务执行时间轴上进行优化排布，以使多任务执行的全局效能最大化。

图2给出了 $Q = 8$ 项具有不同优先级的任务分配给 $N = 2$ 部雷达的任务分配示意图，其中雷达1、雷达2分别分得了5项和3项任务，且在其各自的任务执行时间轴上把任务进行了执行顺序的排布。

可以发现，由于不同任务拥有不同的属性，不同的任务分配和执行方案所带来的探测效能及资源使用代价通常不同。因此，本文要解答的问题就是如何将多个探测任务分配给各个雷达，以及分配后的任务如何排序，以实现多任务全局探测效能的最优。

### 3 多雷达协同任务分配效用函数模型

高效执行协同任务分配的前提是制定一个可评估任务执行效能的指标，并基于该指标实现多雷达协同任务分配。对此，本节提出了一种基于效用函数最大化的任务动态分配模型。首先基于任务质量(Quality of Service, QoS)框架<sup>[13]</sup>，给出了一种多雷达协同任务分配全局效用函数的建模方案，然后基于构建的效用函数，将多雷达协同任务分配建模成一个数学优化问题；随后，利用任务执行距离、任务执行等待时间，完成了对提出的多任务动态分配模型的实例化。

#### 3.1 多雷达协同任务分配全局效用函数及优化问题

本文基于QoS框架，将雷达的任务分配表示为关于效用函数最大化的数学优化问题：

$$\arg \max_{\mathbf{Q}, \mathbf{U} | \mathbf{Q}} \sum_{q=1}^Q \rho^q \varphi^q(\mathbf{Q}, \mathbf{U} | \mathbf{Q}) \quad (6)$$

其中， $\varphi^q(\mathbf{Q}, \mathbf{U} | \mathbf{Q})$ 为任务 $q$ 的效用函数，表示在特定任务分配方案 $\{\mathbf{Q}, \mathbf{U} | \mathbf{Q}\}$ 下任务 $q$ 的执行效能。上述优化问题被写成了 $Q$ 个任务效用函数和对应任务重要性的加权求和，以表示多任务的全局任务效

能。求解该优化问题后，问题的解即对应多任务的分配方案及其在各雷达节点间的执行顺序。考虑到大部分任务分配问题都主要关注任务优化分配后的任务性能和执行效率，因此，可将任务效用函数 $\varphi^q(\mathbf{Q}, \mathbf{U} | \mathbf{Q})$ 进一步拆分成如下形式：

$$\varphi^q(\mathbf{Q}, \mathbf{U} | \mathbf{Q}) = \omega^q(\mathbf{U} | \mathbf{Q}) + e^q(\mathbf{U} | \mathbf{Q}) \quad (7)$$

其中， $\omega^q(\mathbf{U} | \mathbf{Q})$ 为任务 $q$  ( $q = 1, 2, \dots, Q$ )的归一化任务质量函数，用于表征特定任务分配方案 $\{\mathbf{Q}, \mathbf{U} | \mathbf{Q}\}$ 下该项任务能够获得的性能，质量函数值越大则表明任务执行所获得的性能越高； $e^q(\mathbf{U} | \mathbf{Q})$ 为任务 $q$ 的归一化任务效率函数，用于表征该项任务的执行效率，任务效率函数可被建模成一个与雷达时间资源呈负相关的函数。

在实际的探测场景中，上述归一化任务质量函数和任务效率函数的具体表达式可根据特定的任务类型和目标进行针对性的定义。例如：针对目标检测任务，任务质量函数可被定义为与检测概率、虚警概率相关的函数<sup>[25]</sup>；而针对目标跟踪任务，任务质量函数则可被定义为目标参数估计的后验克拉默-拉奥界(Posterior Cramér-Rao Lower Bound, PCRLB)相关函数，用于表征跟踪目标状态估计性能<sup>[26]</sup>。

#### 3.2 基于任务-雷达距离指标的任务质量函数

考虑到包括上述提到的检测概率、跟踪PCRLB在内的大部分探测任务性能指标都与雷达接收信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)相关<sup>[27]</sup>。而根据雷达方程可知，当雷达节点的天线孔径、接收机灵敏度等参数固定时，其接收SNR主要受雷达和目标间的双程时延，即距离的4次方的影响。因此，不失一般性，本文提出了基于探测任务与雷达间距离的任务质量函数，定义如下：

$$\omega^q(\mathbf{U} | \mathbf{Q}) \triangleq \frac{\left(\min_n \{r_n^q\}\right)^4}{\left(\mathbf{u}^q\right)^T \mathbf{r}^q} \in (0, 1] \quad (8)$$

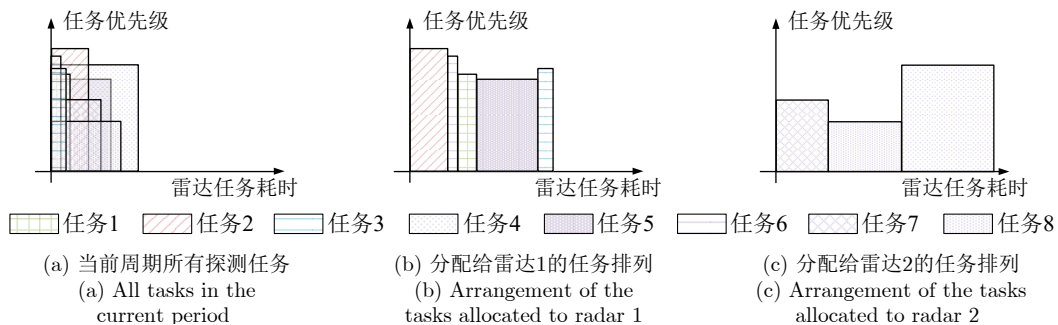


图2 任务规划示意图( $N = 2, Q = 8$ )

Fig. 2 Schematic diagram of the task scheduling with  $N = 2, Q = 8$

其中,  $r_n^q = \sqrt{(x^q - x_n)^2 + (y^q - y_n)^2}$  表示任务  $q$  的任务区域中心  $(x^q, y^q)$  与雷达  $n$  位置  $(x_n, y_n)$  间的距离。 $\mathbf{r}^q = [r_1^q \ r_2^q \ \dots \ r_N^q]^T$  表示所有雷达与任务  $q$  的任务区域中心距离所构成的向量。根据式(8)的定义, 结合  $\mathbf{u}^q$  为0-1变量且  $\mathbf{1}^T \mathbf{u}^q \leq 1$  可以发现, 当任务  $q$  分配给距离其越近的雷达节点执行时, 其任务质量函数值越大。在此情况下, 大的任务质量函数值对应了更高的接收SNR, 进而对应了更好的检测、跟踪等任务性能。

### 3.3 基于等待时间指标的任务效率函数建模

本文以任务等待时间的倒数实现任务效率函数的建模, 基于等待时间的任务效率函数定义如下:

$$e^q(\mathbf{U} | \mathbb{Q}) \triangleq \frac{1}{\left( (\mathbf{u}_{n^*}^q)_{[1:q-1]} \right)^T \mathbf{t}_{[1:q-1]} + 1} \in (0, 1] \quad (9)$$

其中,  $(\cdot)_{[a:b]}$  表示向量  $(\cdot)$  的第  $a$  到第  $b$  个元素构成的子向量, 其中定义特殊情况  $(\cdot)_{[1:0]} = 0$ 。 $\mathbf{u}_{n^*}$  的下标  $n^*$  表示用于执行任务  $q$  的雷达节点序号:

$$n^* \in \{n | u_n^q = 1\} \quad (10)$$

式(9)表明在同一个雷达节点中, 任务的执行效率与其等待时间成反比。当某个任务  $q$  排在雷达节点的第1个执行时, 其任务效率函数值  $e^q(\mathbf{U} | \mathbb{Q}) = 1$ , 若后续等待时间越长, 则任务效率函数值越低。

一般的探测任务规划问题中, 通常会有一个被执行的期待时间窗, 在时间窗内执行该任务, 则通常认为该任务的执行效率是满足要求的。而需要注意的是, 本文是将多雷达的任务执行时间线周期化了, 任务分配是针对某一个任务周期内出现的探测任务。因此, 本文认为在单个任务周期内, 所有需要分配的任务都是在其期待的执行时间窗内的。这种情况下, 利用任务的等待时间对该周期内不同任务执行顺序优化, 理论上可实现: (1)在任务数较少时, 可在满足任务执行期待时间窗前提下, 进一步提升多任务执行效率; (2)在任务数超过雷达执行能力时, 可结合任务的优先级、任务耗时等因素给出一个综合的任务执行方案。

## 4 基于任务效用最大化的多雷达协同在线任务分配算法

### 4.1 基于任务效用最大化的任务分配优化问题

将式(8)和式(9)代入式(7)中, 再将结果代回优化问题式(6), 同时考虑雷达的能力约束, 最终可将多雷达任务分配建模成如下数学优化问题:

$$\begin{aligned} & \arg \max_{\mathbb{Q}, \mathbf{U} | \mathbb{Q}} \rho^q(\omega^q(\mathbf{U} | \mathbb{Q}) + e^q(\mathbf{U} | \mathbb{Q})) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{u}_n^T \mathbf{t} \leq t_{n, \max} \\ \mathbf{1}^T \mathbf{u}^q \leq 1 \\ \mathbf{1}^T \mathbf{U} | \mathbb{Q} \mathbf{1} \leq Q \\ u_n^q \in \{0, 1\} \\ q = 1, 2, \dots, Q, \ n = 1, 2, \dots, N \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

该问题为一个关于整型变量  $\mathbf{U} | \mathbb{Q}$  和  $\mathbb{Q}$  的离散优化问题。可以发现, 不同的任务排列方式  $\mathbb{Q}$  会影响到任务分配变量  $\mathbf{U} | \mathbb{Q}$  的取值以及任务分配后各任务在对应雷达节点的执行顺序, 不存在多项式时间复杂度的算法实现该问题的求解, 因此, 该优化问题是一个NP难问题<sup>[28]</sup>。

### 4.2 穷举搜索

针对优化问题式(11), 最优的解法是对所有的任务分配和任务排序解空间进行穷举搜索。可对每个任务分配到每个雷达节点的情况进行穷举, 再在任务分配特定的组合下, 对各雷达节点内任务的排序进行并行排列计算, 其伪代码如算法1所示。

下面对穷举搜索算法的时间复杂度进行分析, 穷举搜索算法首先包括外部的  $Q$  层串行迭代, 需要执行  $\mathcal{O}(N^Q)$  次循环; 此外, 在上述串行迭代内, 需要对每个雷达分得的任务完成任务排序。任务排序计算可并行执行, 此时对任一雷达最多需要执行  $A_Q^Q = Q!$  次排列, 因此穷举搜索算法最终的时间复杂度为  $\mathcal{O}(N^Q Q!)$ 。

可以发现, 虽然穷举搜索算法遍历了任务分配所有可能的解, 能够找到最优的任务分配结果, 但

#### 算法1 穷举搜索算法

Alg. 1 Exhaustive search algorithm

---

输入: 雷达位置、雷达时间资源、任务位置、任务耗时

```

for idx1 = 1 : N
  for idx2 = 1 : N
    ⋮
    for idxQ = 1 : N
      完成任务-雷达节点分配: 设置  $\mathbf{U} | \mathbb{Q}(\text{idx}_1, 1) = 1$ ,
       $\mathbf{U} | \mathbb{Q}(\text{idx}_2, 2) = 1, \dots, \mathbf{U} | \mathbb{Q}(\text{idx}_Q, Q) = 1$ ,  $\mathbf{U} | \mathbb{Q}$  其余项为0;
      完成任务排序: 根据上一步得到的  $\mathbf{U} | \mathbb{Q}$ , 对每个雷达分得任务进行排列, 并计算每次排列对应问题的目标函数值, 选出效用函数最大排列结果, 记为  $\phi(\text{idx}_1, \text{idx}_2, \dots, \text{idx}_Q)$ ;
    end
    ⋮
  end
  ⋮
end
end

```

选出最大的  $\phi(\text{idx}_1, \text{idx}_2, \dots, \text{idx}_Q)$ , 其对应的任务分配方案即为最优任务分配, 记为:  $\{\mathbb{Q}, \mathbf{U} | \mathbb{Q}\}^{\text{OPT}}$ ;

输出: 任务分配方案  $\{\mathbb{Q}, \mathbf{U} | \mathbb{Q}\}^{\text{OPT}}$

---

由于任务规划问题的NP难特性，该最优算法的计算量巨大，时间复杂度随任务数量的增加呈指数乘以阶乘的水平增加。当任务数较多时，穷举搜索算法将导致计算的维度灾难。

### 4.3 基于凸松弛的两步解耦算法(CRTSD)

为了降低式(11)的求解复杂度，以满足在线任务分配的实时性要求，本文将提出一种次优的CRTSD求解算法，以实现在多项式时间复杂度内完成对问题的求解。

CRTSD将任务排列变量 $Q$ 与任务分配变量 $U|_Q$ 解耦，以实现问题降维，包含两个主要步骤。第1步是在特定的任务排列下，完成任务分配变量的确定；第2步则是在确定任务分配变量后，再次对各雷达节点分得的任务进行排序，以实现任务效用最大化。

#### 4.3.1 基于任务重要性优先原则的任务排列

可以发现，由于雷达节点是在特定的任务排列 $Q$ 下，按照任务分配变量 $U|_Q$ 每一行从左至右依次执行分配任务的。因此，任务排列变量 $Q$ 会决定任务执行的先后顺序，并且与任务分配变量 $U|_Q$ 呈强耦合关系。考虑到重要性程度高的任务通常被期望尽快执行，因此，不妨先以任务重要性 $\rho^q$ 对任务进行初始排列，从而得到任务排列变量 $Q$ ，并将其从优化问题中解耦。因此，任务排列变量 $Q$ 可表示为

$$\{[\tilde{\rho}^1, \tilde{\rho}^2, \dots, \tilde{\rho}^Q], Q\} \triangleq \text{sort}([\rho^1, \rho^2, \dots, \rho^Q], \text{descend}) \quad (12)$$

其中， $[\tilde{\rho}^1, \tilde{\rho}^2, \dots, \tilde{\rho}^Q]$ 和 $Q$ 分别表示 $Q$ 个任务按照任务重要性降序排列之后的任务重要性以及对应排序后的任务编号。将式(12)中的 $Q$ 代入式(11)中，可以得到只包含任务分配变量 $U|_Q$ 的优化问题：

$$\begin{aligned} & \arg \max_{U|_Q} \rho^q (\omega^q (U|_Q) + e^q (U|_Q)) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{u}_n^T \mathbf{t} \leq t_{n,\max} \\ \mathbf{1}^T \mathbf{u}^q \leq 1 \\ \mathbf{1}^T U|_Q \mathbf{1} \leq Q \\ u_n^q \in \{0, 1\} \\ q = 1, 2, \dots, Q, n = 1, 2, \dots, N \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)依旧为一个离散非凸问题。为了进一步简化其求解，可以对其进行连续化的放缩，即将0-1变量 $u_n^q$ 放缩为一个0到1之间的连续变量。此外，在根据任务分配给各个雷达之后，任务执行效率 $e^q(U|_Q)$ 可通过对雷达分得的任务进行排序而计算得到。此时，可将问题式(13)目标函数中的任务执行效率 $e^q(U|_Q)$ 项省略，以降低问题求解的复杂度。因此，省略任务执行效率 $e^q(U|_Q)$ 项后，优化问题式(13)可变为如下形式：

$$\begin{aligned} & \arg \max_{U|_Q} \rho^q \frac{\left(\min_n \{r_n^q\}\right)^4}{\left((\mathbf{u}^q)^T \mathbf{r}^q\right)^4} \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{u}_n^T \mathbf{t} \leq t_{n,\max} \\ \mathbf{1}^T \mathbf{u}^q \leq 1 \\ \mathbf{1}^T U|_Q \mathbf{1} \leq Q \\ 0 \leq u_n^q \leq 1 \\ q = 1, 2, \dots, Q, n = 1, 2, \dots, N \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

上述优化问题的等价形式可表示为

$$\begin{aligned} & \arg \min_{U|_Q} \frac{\left((\mathbf{u}^q)^T \mathbf{r}^q\right)^4}{\rho^q \left(\min_n \{r_n^q\}\right)^4} \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{u}_n^T \mathbf{t} \leq t_{n,\max} \\ \mathbf{1}^T \mathbf{u}^q \leq 1 \\ \mathbf{1}^T U|_Q \mathbf{1} \leq Q \\ 0 \leq u_n^q \leq 1 \\ q = 1, 2, \dots, Q, n = 1, 2, \dots, N \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

在经过多次放缩之后，式(15)为一个4次的凸优化问题，可通过常用的凸优化算法进行直接求解，本文采用CVX tools对其进行求解<sup>[29]</sup>。在求解优化问题式(15)后可确定连续的任务分配变量 $U|_Q$ 。接下来需要对其进行离散化，以得到最终的任务分配结果。实现离散化的算法如算法2所示。

#### 算法2 离散化任务分配变量

Alg. 2 Discretization of task scheduling variables

---

输入：问题求解得到的任务分配变量 $U|_Q$   
 初始化任务分配变量 $U^{\text{opt}}$ 为 $N \times Q$ 维零矩阵；  
 for  $i = 1 : NQ$   
   找出 $U|_Q$ 中最大元素，记为 $U|_Q(q, n)$ ；  
   判断若将 $U^{\text{opt}}(q, n)$ 设置为1，并将 $U^{\text{opt}}$ 代入式(15)后，是否满足式(15)的所有约束；  
   若满足，则设置 $U^{\text{opt}}(q, n) = 1$ ；  
   设置 $U|_Q(q, n) = 0$ ；  
 end  
 输出：离散化的任务分配变量 $U^{\text{opt}}$

---

#### 4.3.2 任务执行顺序重排序

在确定任务分配变量 $U^{\text{opt}}$ 后，可根据任务分配结果对任务执行顺序进行重排列，以进一步提升任务效能。将 $U^{\text{opt}}$ 代入任务效用函数，可得到如下任务 $q$ 的加权效用函数表达式：

$$\begin{aligned} \phi^q &= \rho^q (\omega^q (U^{\text{opt}}) + e^q (U|_Q)) \\ &= \rho^q \omega^q (U^{\text{opt}}) + \rho^q e^q (U|_Q) \end{aligned} \quad (16)$$

为了明确每个任务在对应雷达中的执行顺序，这里定义如下函数：

$$\begin{aligned}\Delta\phi^q &= \phi_0^q - \phi_1^q \\ &= \rho^q \frac{\mathbf{u}_{n^*}^T \mathbf{t} - t^q}{\mathbf{u}_{n^*}^T \mathbf{t} + 1 - t^q}\end{aligned}\quad (17)$$

其中,  $\phi_0^q = \rho^q \omega^q (\mathbf{U}^{\text{opt}}) + \rho^q$  表示任务  $q$  被安排在第 1 个执行时的加权任务效用值;  $\phi_1^q = \rho^q \omega^q (\mathbf{U}^{\text{opt}}) + \rho^q (\mathbf{u}_{n^*}^T \mathbf{t} + 1 - t^q)^{-1}$  表示任务  $q$  被安排在最后一个执行时的加权任务效用。在此定义下,  $\Delta\phi^q = \phi_0^q - \phi_1^q$  可表征任务  $q$  的加权任务效用值随其执行顺序变化下的敏感性。在实际任务分配场景中,  $\Delta\phi^q$  值越大的任务通常可被期望排在越前执行, 以维持其较高的任务效用。因此, 修正后的任务效用可表示为

$$\begin{aligned}\left\{ \left[ \Delta\tilde{\phi}^1, \Delta\tilde{\phi}^2, \dots, \Delta\tilde{\phi}^Q \right], \mathbb{Q}^{\text{opt}} \right\} \\ \triangleq \text{sort} \left( \left[ \Delta\phi^1, \Delta\phi^2, \dots, \Delta\phi^Q \right], \text{descend} \right)\end{aligned}\quad (18)$$

最后  $\{\mathbb{Q}^{\text{opt}}, \mathbf{U}^{\text{opt}}\}$  即为得到的任务分配问题的解, 图 3 为 CRTSD 算法的流程图。

可以发现, 由于 CRTSD 算法中存在凸松弛以及在任务排序时使用了启发式求解等手段, 其问题的解并非最优。但本文会在后续仿真实验中通过与最优的穷举搜索算法对比来证明, CRTSD 算法在大多数场景下都能找到令人满意的次优解。

下面对 CRTSD 算法的时间复杂度进行分析, CRTSD 算法主要包括以下 4 个步骤: (1) 任务重要性排序; (2) 凸松弛; (3) 离散化任务分配变量; (4) 任务执行顺序重排序 4 个串行执行的模块。其中: 步骤 (1) 和步骤 (4) 若采用最简单的冒泡排序算法, 时间复杂度为  $\mathcal{O}(NQ^2)$ ; 步骤 (2) 若采用等步长的梯度下降算法实现凸问题求解, 则其时间复杂度为  $\mathcal{O}(1/\varepsilon)$ , 其中  $\varepsilon$  为梯度下降算法的停止精度; 步骤 (3) 需要执行  $\mathcal{O}(NQ)$  次迭代。由于这 4 个步骤是串行执行的, CRTSD 算法的总体复杂度为

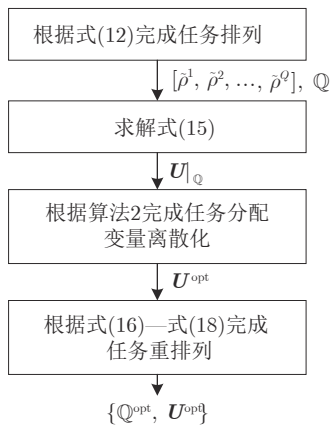


图 3 CRTSD 算法流程图

Fig. 3 Schematic diagram of the CRTSD algorithm

$$\max \{ \mathcal{O}(NQ^2), \mathcal{O}(1/\varepsilon), \mathcal{O}(NQ) \} \approx \mathcal{O}(n^3) \quad (19)$$

可以发现, CRTSD 算法可在多项式时间内完成问题求解, 相比于穷举搜索算法的阶乘级复杂度, CRTSD 算法时间复杂度可大为下降。

#### 4.4 启发式贪婪搜索算法

除 CRTSD 算法外, 本文还提供了一种次优的启发式算法用于实现任务的在线分配。该算法相较于 CRTSD 算法而言, 其优化性能精度稍差, 但在大规模问题中可具备更低的算法复杂度。主要基于贪婪的规则, 包括以下两个步骤: (1) 在  $t_{n,\max}$  的约束下, 每个任务分给距离其最近的雷达节点执行, 以实现任务分配; (2) 完成任务分配后, 每部雷达节点内的任务按照其重要性由高到低进行排序和执行。启发式贪婪算法的执行流程如算法 3 所示。

可以发现, 若串行执行, 启发式贪婪算法的复杂度仍旧在  $\mathcal{O}(n^3)$ 。但相较于 CRTSD 算法而言, 由于启发式贪婪算法各雷达节点任务排序部分相互独立, 若采用并行执行的手段 (如 MATLAB 中的 parfor 命令), 则可将排序的复杂度降低, 整体复杂度最低可降至  $\mathcal{O}(n^2)$ 。因此, 相比于穷举和 CRTSD 算法, 启发式贪婪算法在大规模任务分配问题中可望拥有更低的时间复杂度。

## 5 仿真实验

本节将给出几组仿真场景, 用以展示本文提出的启发式贪婪搜索算法、CRTSD 算法的有效性。考虑如图 4 所示的探测场景:  $N = 4$  部雷达完成对一个  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$  方形区域的协同探测, 为便于

算法 3 启发式贪婪算法

Alg. 3 Heuristic greedy search algorithm

输入: 雷达位置、雷达时间资源、任务位置、任务耗时

设置  $r_{\max}^q = 0$  ( $q = 1, 2, \dots, Q$ );

for  $q = 1 : Q$

for  $n = 1 : N$

计算任务  $q$  与雷达  $n$  的距离  $r_n^q$ ;

if  $r_n^q > r_{\max}^q$  and  $t_{n,\max} > t^q$

将任务  $q$  改为分配给节点  $n$ ;

设置  $t_{n,\max} = t_{n,\max} - t^q$ ,  $r_{\max}^q = r_n^q$ ;

end

end

end

for  $n = 1 : N$

对雷达  $n$  分得的任务进行排序;

end

输出: 任务分配变量  $\mathbf{U}^{\text{opt}}$

后续任务分配结果的对比，考虑这4部雷达分布在方形区域的4个角，坐标 $(x_n, y_n)$ 依次为(1 km, 1 km), (9 km, 1 km), (1 km, 9 km)和(9 km, 9 km)，每部雷达的最大可用时间资源 $t_{n,max} = 10$  s； $Q$ 个探测任务出现在该方形区域内，其位置 $(x^q, y^q)$ 在10 km $\times$ 10 km的方形区域均匀分布。类似地，每项任务重要性在 $\lambda$ 到1之间呈均匀分布 $\rho^q \sim U(\lambda, 1)$ ，任务耗时在0到1 s之间呈均匀分布 $t^q \sim U(0, 1)$ 。

### 5.1 不同算法性能比较

第1个场景如图4所示，为了便于展示任务分配的结果，考虑较少的任务数量，区域内存在 $Q = 8$ 个待分配任务，并将任务1到任务8根据其任务重要性由高到低进行排序，即对 $\forall q > 1, \rho^{q-1} > \rho^q$ ，设置任务重要性分布相关参数 $\lambda = 0.9$ 。

图5和图6分别展示了穷举搜索、提出的CRTSD算法和启发式贪婪算法下任务分配以及任务排序的结果。为便于观察，图5中的两条点线将整个监视区域划分成了4块，划分后的每块区域分别对应距离这4部雷达最近的区域，雷达与任务存在连线表

示该任务分配给该雷达节点执行。图6的每个阶梯表示单个任务执行的耗时。

从图5可以发现，启发式贪婪算法和CRTSD算法中，在时间资源 $t_{n,max}$ 足够的情况下，都将任务分配给距离最近的雷达节点。考虑到雷达接收SNR主要受距离因素的影响，这是一种直观且合理的方案。相比之下，虽然最优的穷举搜索算法任务分配主要还是受距离因素的影响，但可以发现，在

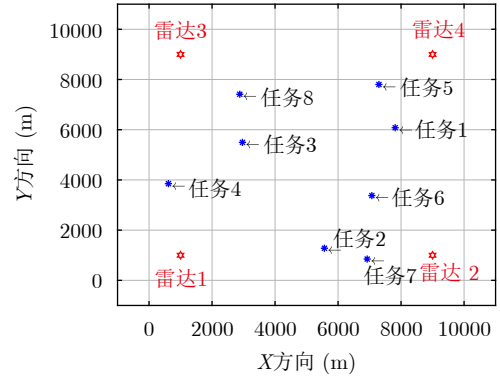


图4 多雷达-多任务探测场景

Fig. 4 Task scenario of multiradar with multitask

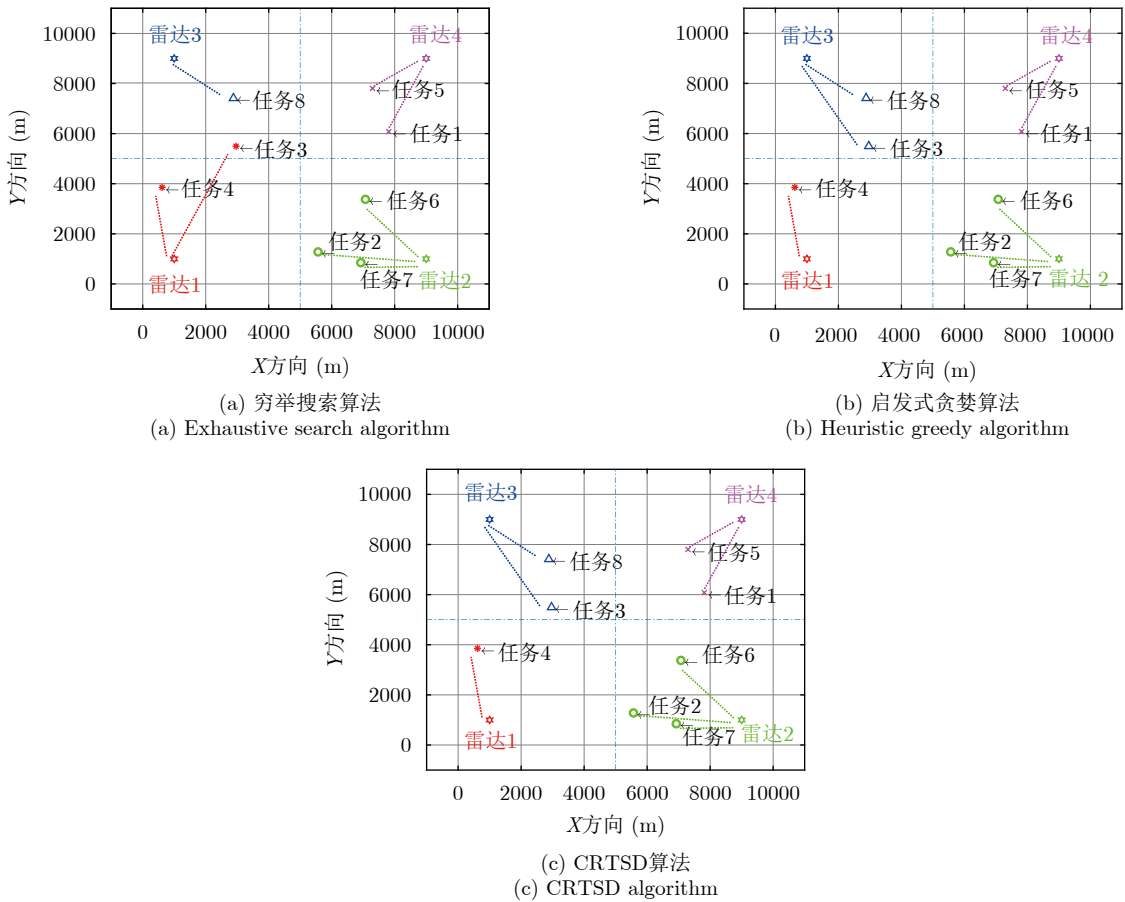


图5 3种算法下的多雷达-多任务分配结果

Fig. 5 Multiradar-multitask scheduling results of the three algorithms



另外两种次优算法中分配给雷达3的任务3被分配给了距离其次近的雷达1。结合图6可以发现，这是由于次优算法中分给雷达3的任务3和任务8都需要消耗较大的时间资源，导致雷达3的任务响应效率较低。此时，穷举搜索将任务3分配给任务较少的雷达1，可以提升整体的任务效能。由此可知，最优的任务分配应当充分考虑任务探测性能和整体任务执行效率之间的权衡。

通过对比图6(b)和图6(c)可发现启发式贪婪算

法只是按照任务的重要性由高到低对其进行执行顺序的安排。而从CRTSD算法对雷达2的任务安排可知，CRTSD算法会将执行耗时短的任务(任务7)优先执行，相比于启发式贪婪算法的安排，CRTSD算法在任务2执行效率稍微损失前提下，可显著降低任务6、任务7的执行等待时间，从而有望提升整体的任务执行效能。

图7和图8分别展示了不同任务数量 $Q$ 下，3种算法得到的任务效用函数值和运行时间对比。其

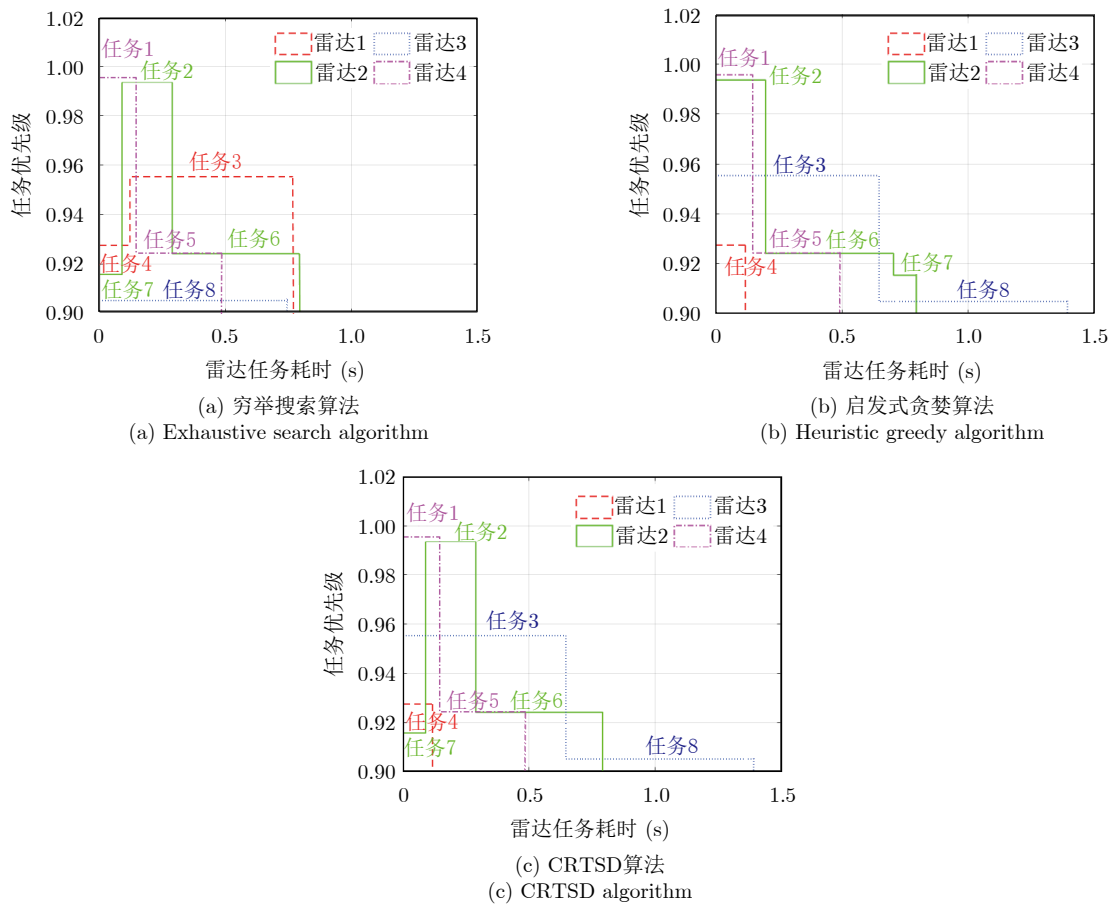


图 6 3种算法下的各雷达分得的任务执行顺序排序结果

Fig. 6 The task execution order of each radar under the three algorithms

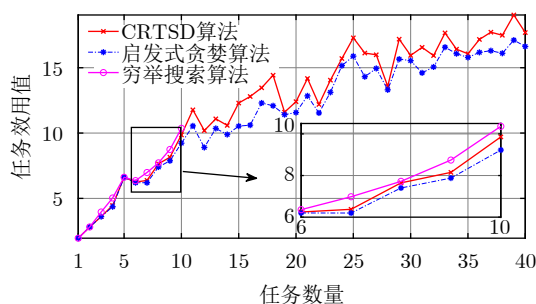


图 7 不同任务数量 $Q$ 下3种算法得到的任务效用值

Fig. 7 Task utility values of the three algorithms with different number of tasks  $Q$

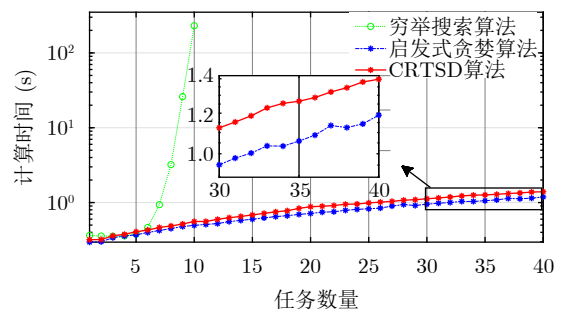


图 8 不同任务数量 $Q$ 下3种算法运行时间

Fig. 8 Runtime of the three algorithms with different number of tasks  $Q$

中，运行时间是在MATLAB 2022a软件平台、i7-11700K处理器、32GB内存硬件平台下得到的。由于穷举搜索算法涉及枚举 $Q$ 个任务的全排列，MATLAB仿真软件仅支持生成 $A_{10}^{10} = 10! = 3628800$ 种排列情况，因此穷举搜索算法只给出了 $Q$ 从1到10的情况。可以发现，CRTSD算法可获得显著高于启发式贪婪算法的任务效能，且在任务数量较少时与启发式贪婪算法拥有近似的计算时间。而在任务数量较大时，启发式贪婪算法拥有最快的执行时间。此外，虽然穷举搜索算法能够获得最好的任务效用值，但其计算时间是呈指数级增长的，在 $Q = 10$ 的情况下为302 s，约为CRTSD算法的600倍。同时可以预见，随目标数的增长，穷举搜索算法的计算时间将进一步恶化。

### 5.2 复杂场景下提出算法的适应性

本节将给出更为复杂的任务分配场景，以体现本文提出算法在不同场景下的适应性。由于启发式贪婪搜索算法的任务分配结果与CRTSD算法类似，本文接下来主要展示CRTSD算法的任务分配结果。本节仿真实验中，考虑存在 $Q = 40$ 个任务待

分配，其余参数与5.1节保持一致。主要考虑不同雷达探测构型以及不同任务重要性情况下任务分配结果的合理性及其自适应程度。

图9给出了 $N = 4$ 部雷达线性探测构型和不规则探测构型下对 $Q = 40$ 个探测任务的分配结果。其中，情况1下每部雷达的最大可用时间资源均为 $t_{n,max} = 10$  s，情况2下雷达3的最大可用时间资源减少到 $t_{3,max} = 1$  s。可以发现，在时间资源足够情况下(情况1)，两种构型都倾向于将任务分配给距离其最近的节点，其中雷达3在两种构型下都被分配了最多的任务。当减少雷达3的可用时间资源至 $t_{3,max} = 1$  s后(情况2)，原本雷达3需要执行的任务同样按照距离远近被依次分配给了其余3个节点，这展示了本文提出的CRTSD算法在雷达节点变化情况下的适应性。

图10给出了在不同任务重要性参数分布下，40个任务的优先级 $\rho^q$  ( $q = 1, 2, \dots, 40$ )以及CRTSD算法所得到的对应的任务效用值分布。可以发现，不同任务间的优先级差距越大，优先级越高的任务越倾向于获得更高的效用值。由此可见，CRTSD算法针对优先级的变化也能够给出合理的分配结果。同

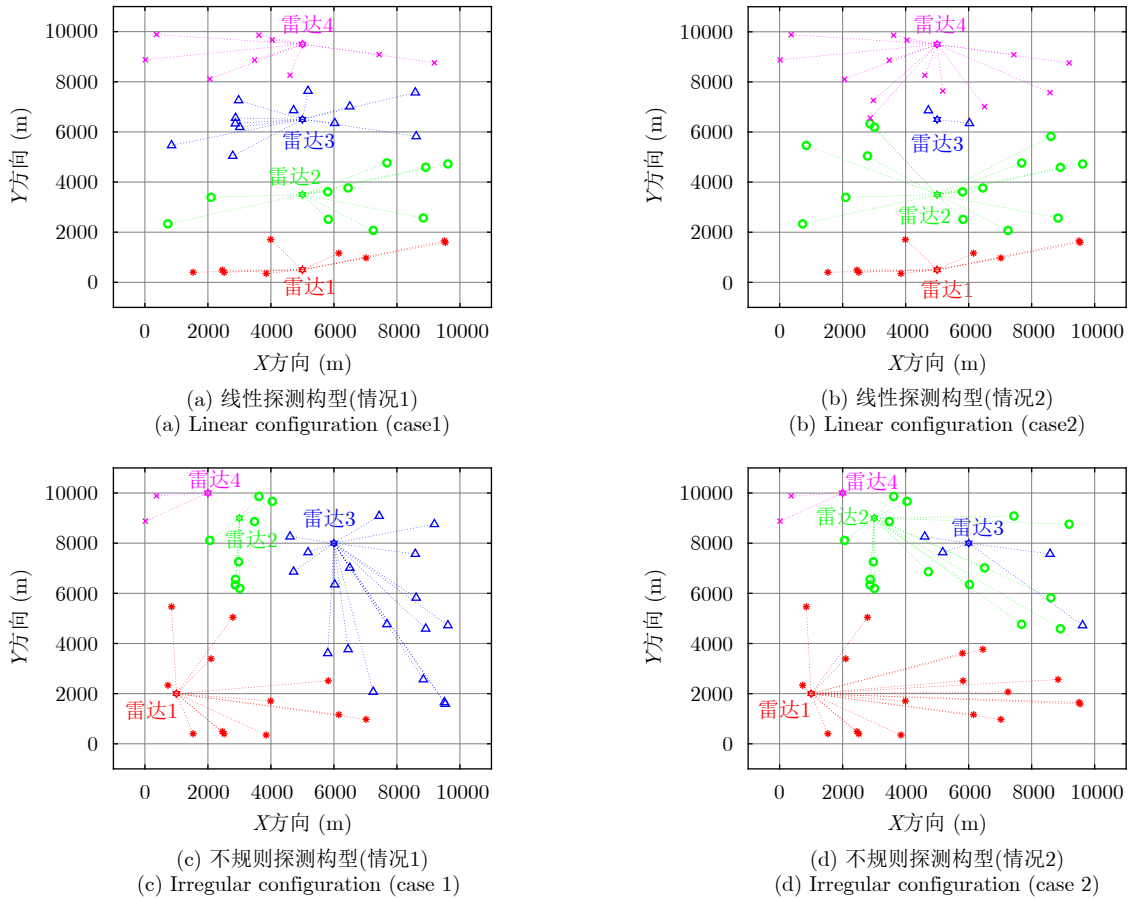


图9 不同探测构型下CRTSD算法任务分配结果

Fig. 9 Task scheduling results of CRTSD algorithm with different radar configurations

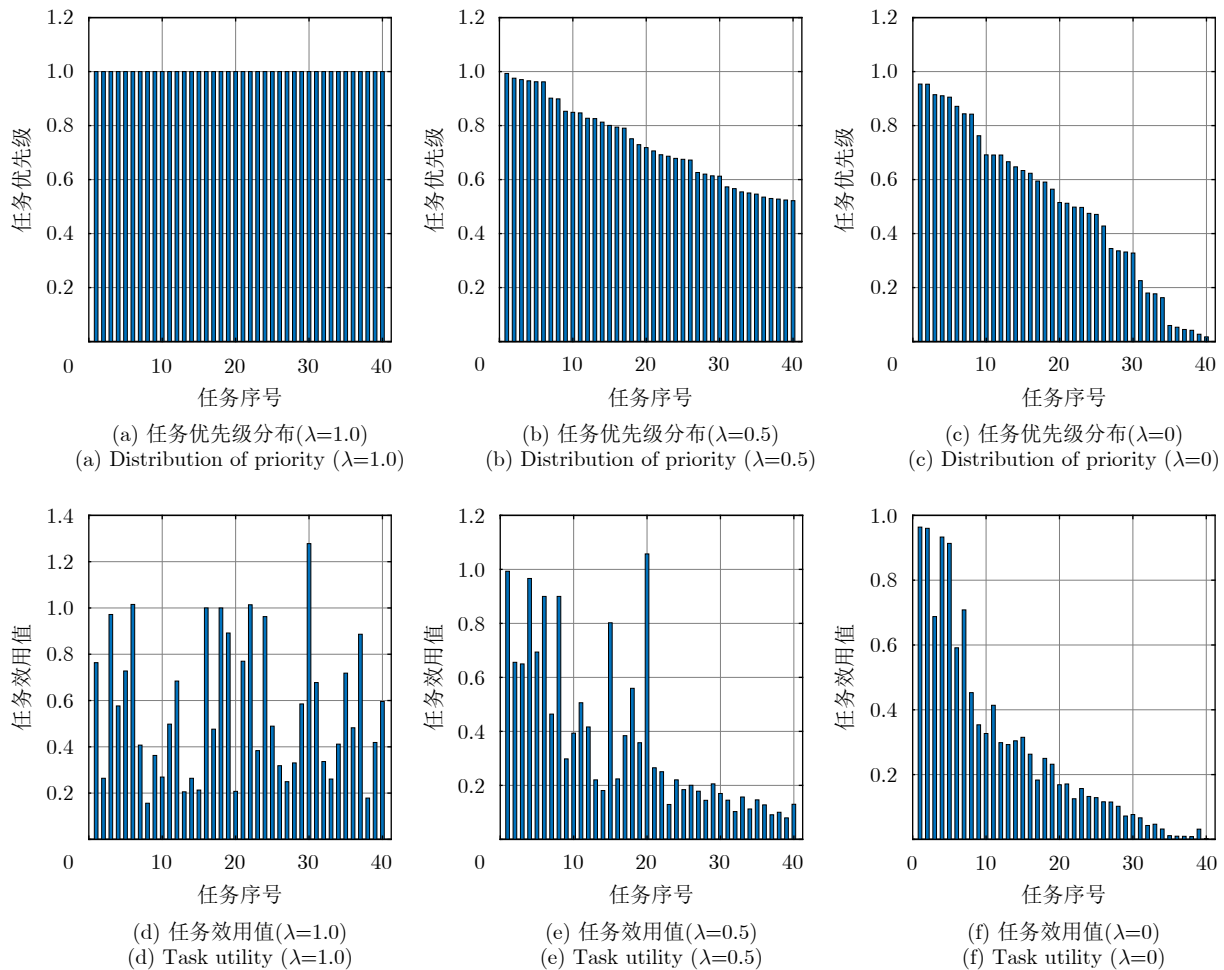


图 10 不同任务优先级设置下CRTSD算法得到的任务效用值

Fig. 10 Task utility values of CRTSD algorithm with different task priorities

时,在实际应用场景中可通过增加某项重要任务的 $\rho^q$ 值来保证其执行的性能和响应效率。

## 6 结语

本文针对多雷达协同探测场景下的多任务在线分配需求,提出了一种基于任务效用最大化的在线任务分配算法。该算法将多任务的执行效能建模成与任务-雷达节点分配结果相关的函数,通过最大化多任务的全局效能,把任务分配问题建模成一个离散整数规划问题;为求解得到的该离散高维优化问题,本文提出了启发式贪婪搜索和CRTSD算法,并在多项式时间内找到了问题的解。CRTSD算法具备更高的优化求解精度,而启发式贪婪算法具备相对较快的计算速度,使用者可根据所用平台的计算能力、实时性要求、任务分配规模等因素,综合权衡选择提出的优化算法。最后,通过仿真实验证明了提出的任务分配算法可动态适应探测任务性能、任务响应效率、任务重要性等参数变化,自适应地得到全局任务效能最大化的多任务多雷达分配方案。

此外,本文主要以探测性能和任务执行效率两个要素为例定义了多任务执行的效用函数。本文提出的任务分配框架还可根据特定的任务需求,进行多元化的拓展设计,可应用到更为广泛的多雷达多任务在线分配问题中。

## 参考文献

- [1] BAKER C J and HUME A L. Netted radar sensing[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2003, 18(2): 3-6. doi: 10.1109/MAES.2003.1183861.
- [2] 马林,周琳. 预警系统协同探测技术研究[J]. *现代雷达*, 2020, 42(12): 1-6. doi: 10.16592/j.cnki.1004-7859.2020.12.001.  
MA Lin and ZHOU Lin. A study on collaborative detection technology of early warning system[J]. *Modern Radar*, 2020, 42(12): 1-6. doi: 10.16592/j.cnki.1004-7859.2020.12.001.
- [3] 刘宏伟,严峻坤,周生华. 网络化雷达协同探测技术[J]. *现代雷达*, 2020, 42(12): 7-12. doi: 10.16592/j.cnki.1004-7859.2020.12.002.  
LIU Hongwei, YAN Junkun, and ZHOU Shenghua. Collaborative detection technology of netted radar[J].

- Modern Radar*, 2020, 42(12): 7–12. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2020.12.002](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2020.12.002).
- [4] 时晨光, 王奕杰, 代向荣, 等. 面向目标跟踪的机载组网雷达辐射参数与航迹规划联合优化算法[J]. 雷达学报, 2022, 11(5): 778–793. doi: [10.12000/JR22005](https://doi.org/10.12000/JR22005).  
SHI Chenguang, WANG Yijie, DAI Xiangrong, et al. Joint transmit resources and trajectory planning for target tracking in airborne radar networks[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(5): 778–793. doi: [10.12000/JR22005](https://doi.org/10.12000/JR22005).
- [5] 余显祥, 路晴辉, 杨婧, 等. 短基线收发分置频域协同波形设计方法[J]. 雷达学报, 2022, 11(2): 227–239. doi: [10.12000/JR22014](https://doi.org/10.12000/JR22014).  
YU Xianxiang, LU Qinghui, YANG Jing, et al. Frequency domain cooperative waveform design method for short baseline transceiver[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(2): 227–239. doi: [10.12000/JR22014](https://doi.org/10.12000/JR22014).
- [6] 杨晨阳, 毛士艺, 李少洪. 相控阵雷达中的TWS和TAS跟踪技术[J]. 电子学报, 1999, 27(6): 1–4, 8. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.1999.06.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.1999.06.001).  
YANG Chenyang, MAO Shiyi, and LI Shaohong. Track-While-Scan and Track-and Search tracking techniques in phased array radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(6): 1–4, 8. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.1999.06.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.1999.06.001).
- [7] CHARLISH A, WOODBRIDGE K, and GRIFFITHS H. Phased array radar resource management using continuous double auction[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(3): 2212–2224. doi: [10.1109/TAES.2015.130558](https://doi.org/10.1109/TAES.2015.130558).
- [8] DAI Jinhui, YAN Junkun, PU Wenqiang, et al. Adaptive channel assignment for maneuvering target tracking in multistatic passive radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, in press. doi: [10.1109/TAES.2022.3218610](https://doi.org/10.1109/TAES.2022.3218610).
- [9] SUN Hao, LI Ming, ZUO Lei, et al. Joint radar scheduling and beam pattern design for multitarget tracking in netted colocated MIMO radar systems[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2021, 28: 1863–1867. doi: [10.1109/LSP.2021.3108675](https://doi.org/10.1109/LSP.2021.3108675).
- [10] 时晨光, 丁琳涛, 汪飞, 等. 面向射频隐身的组网雷达多目标跟踪下射频辐射资源优化分配算法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(3): 539–546. doi: [10.11999/JEIT200636](https://doi.org/10.11999/JEIT200636).  
SHI Chenguang, DING Lintao, WANG Fei, et al. Radio frequency stealth-based optimal radio frequency resource allocation algorithm for multiple-target tracking in radar network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(3): 539–546. doi: [10.11999/JEIT200636](https://doi.org/10.11999/JEIT200636).
- [11] 卢建斌, 肖慧, 胡卫东, 等. 基于非精确计算的空间探测相控阵雷达任务规划算法[J]. 飞行器测控学报, 2007, 26(3): 18–24.  
LU Jianbin, XIAO Hui, HU Weidong, et al. Mission planning algorithm based on imprecise computation for space detecting phased-array radars[J]. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2007, 26(3): 18–24.
- [12] 严俊坤, 白舸, 黄佳沁, 等. 多机雷达协同区域动态覆盖航迹优化方法[J]. 雷达学报, 2023, 12(3): 541–549. doi: [10.12000/JR22196](https://doi.org/10.12000/JR22196).  
YAN Junkun, BAI Ge, HUANG Jiaqin, et al. Flight path optimization method for dynamic area coverage based on multi-aircraft radars[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(3): 541–549. doi: [10.12000/JR22196](https://doi.org/10.12000/JR22196).
- [13] YUAN Ye, YI Wei, KIRUBARAJAN T, et al. Scaled accuracy based power allocation for multi-target tracking with colocated MIMO radars[J]. *Signal Processing*, 2019, 158: 227–240. doi: [10.1016/j.sigpro.2019.01.014](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2019.01.014).
- [14] 张大琳, 易伟, 孔令讲. 面向组网雷达干扰任务的多干扰机资源联合优化分配方法[J]. 雷达学报, 2021, 10(4): 595–606. doi: [10.12000/JR21071](https://doi.org/10.12000/JR21071).  
ZHANG Dalin, YI Wei, and KONG Lingjiang. Optimal joint allocation of multijammer resources for jamming netted radar system[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(4): 595–606. doi: [10.12000/JR21071](https://doi.org/10.12000/JR21071).
- [15] 李正杰, 谢军伟, 张浩为, 等. 一种低截获背景下的集中式MIMO雷达快速功率分配算法[J]. 雷达学报, 2023, 12(3): 602–615. doi: [10.12000/JR22203](https://doi.org/10.12000/JR22203).  
LI Zhengjie, XIE Junwei, ZHANG Haowei, et al. A fast power allocation algorithm in a colocated MIMO radar under low interception backgrounds[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(3): 602–615. doi: [10.12000/JR22203](https://doi.org/10.12000/JR22203).
- [16] ZHANG Haowei, LIU Weijian, ZONG Bin Feng, et al. An efficient power allocation strategy for maneuvering target tracking in cognitive MIMO radar[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, 69: 1591–1602. doi: [10.1109/TSP.2020.3047227](https://doi.org/10.1109/TSP.2020.3047227).
- [17] DING Lintao, SHI Chenguang, QIU Wei, et al. Joint dwell time and bandwidth optimization for multi-target tracking in radar network based on low probability of intercept[J]. *Sensors*, 2020, 20(5): 1269. doi: [10.3390/s20051269](https://doi.org/10.3390/s20051269).
- [18] 程婷, 恒思宇, 李中柱. 基于脉冲交错的分布式雷达组网系统波束驻留调度[J]. 雷达学报, 2023, 12(3): 616–628. doi: [10.12000/JR22211](https://doi.org/10.12000/JR22211).  
CHENG Ting, HENG Siyu, and LI Zhongzhu. Real-time dwell scheduling algorithm for distributed phased array radar network based on pulse interleaving[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(3): 616–628. doi: [10.12000/JR22211](https://doi.org/10.12000/JR22211).
- [19] CHENG Ting, LI Shuyi, and ZHANG Jie. Adaptive resource management in multiple targets tracking for colocated multiple input multiple output radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(9): 1038–1045. doi: [10.1049/iet-rsn.2018.5153](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2018.5153).
- [20] 韦刚, 刘昌云, 郭相科. 基于多属性决策的相控阵雷达截获任务规划算法[J]. 现代雷达, 2016, 38(10): 42–46. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.10.011](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.10.011).

- WEI Gang, LIU Changyun, and GUO Xiangke. Algorithms of search mission planning in phased array radar based on multi-attribute decision[J]. *Modern Radar*, 2016, 38(10): 42–46. doi: 10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.10.011.
- [21] 朱希同, 杨瑞娟, 李晓柏, 等. 一种多功能天波超视距雷达任务规划调度方法[J]. *舰船电子工程*, 2022, 42(2): 75–80. doi: 10.3969/j.issn.1672-9730.2022.02.016.
- ZHU Xitong, YANG Ruijuan, LI Xiaobai, *et al.* A multifunctional sky-wave over-the-horizon radar task planning and scheduling method[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2022, 42(2): 75–80. doi: 10.3969/j.issn.1672-9730.2022.02.016.
- [22] 赵宇, 李建勋, 曹兰英, 等. 基于二次规划的相控阵雷达任务自适应调度算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2012, 34(4): 698–703. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.04.11.
- ZHAO Yu, LI Jianxun, CAO Lanying, *et al.* Adaptive scheduling algorithm based on quadratic programming for multifunction phased array radars[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(4): 698–703. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.04.11.
- [23] 展红英. 相控阵雷达系统实时任务负载分配仿真研究[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2014.
- ZHAN Hongying. Research of real-time tasks load assignment simulation in phased array radar system[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [24] 卢建斌, 肖慧, 席泽敏, 等. 相控阵雷达波束波形联合自适应调度算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(1): 84–88. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.01.17.
- LU Jianbin, XIAO Hui, XI Zemin, *et al.* Joint adaptive scheduling algorithm of beam and waveform for phased array radars[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(1): 84–88. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.01.17.
- [25] IRCI A, SARANLI A, and BAYKAL B. Study on Q-RAM and feasible directions based methods for resource management in phased array radar systems[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(4): 1848–1864. doi: 10.1109/TAES.2010.5595599.
- [26] TICHAVSKY P, MURAVCHIK C H, and NEHORAI A. Posterior Cramér-Rao bounds for discrete-time nonlinear filtering[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1998, 46(5): 1386–1396. doi: 10.1109/78.668800.
- [27] SKOLNIK M I. Theoretical accuracy of radar measurements[J]. *IRE Transactions on Aeronautical and Navigational Electronics*, 1960, ANE-7(4): 123–129. doi: 10.1109/TANE3.1960.4201757.
- [28] BOVET D P and CRESCENZI P. Introduction to the Theory of Complexity: Vol. 7[M]. New York: Prentice Hall, 1994.
- [29] GRANT M. CVX: MATLAB software for disciplined convex programming[EB/OL]. <http://cvxr.com/cvx>, 2008.

### 作者简介

袁 野, 博士, 主要研究方向为多雷达协同探测、目标跟踪、雷达资源管控技术等。

杨 剑, 博士, 副教授, 主要研究方向为雷达信号处理、阵列信号处理、精确制导与对抗技术等。

刘辛雨, 博士生, 主要研究方向为雷达通信一体化信号设计、雷达对抗波形设计等。

易 伟, 博士, 教授, 主要研究方向为低可观测目标检测跟踪、多雷达协同探测等。

孔令讲, 博士, 教授, 主要研究方向为新体制雷达、统计信号处理、优化理论和算法、雷达信号处理、非合作信号处理技术和自适应阵列信号处理等。

(责任编辑: 高山流水)