**绪论**

**选题背景及研究意义**

雷达自从其被发明那天开始就在人类的生产生活中占据了重要的位置。在科学技术日益进步的今天，无论是无人驾驶还是飞机巡航等方面都少不了雷达的身影。为了提高对目标的探测的准确性,以及在有多个目标的情况下实现低误差性,现代的雷达系统都具有多种工作模式对目标进行探测[1]。对于多个不同的模式或波束进行调度是一个很重要的问题，也即本选题的波束调度问题。对于该问题，一方面需要提高结果的准确性,另一方面又要减小传感器状态转变或者探测的花费。传感器调度问题一般为离散优化问题。对于该问题有很多种解决方法,如动态规划、贪心算法、枚举法，或者是本选题采用的Rollout算法。Rollout算法可以说是一个权衡计算复杂度与算法精确性之后的结果，具有重要的应用价值。因此，本课题将Rollout算法应用于雷达多波束调度问题，并与短视算法、动态规划算法进行比较分析，为工程应用提供指导和借鉴。

**国内外研究现状**

**调度算法**

**1.精确性算法**

精确性算法用于得到问题的最优解。在求解整数规划问题中，精确性算法主要有 0-1 规划算法、动态规划算法、分支定界算法三个方向。0-1 规划问题是决策变量仅取值为 0 或 1 的问题，求解这类问题主要为隐枚举法(如分支定界法)，Patterson 和 Huber 首先使用 0-1 规划对 RCPSP 问题进行建模，然后使用定界法对问题进行求解，最后与枚举法进行对比。求解结果优于枚举法[6]。动态规划是将多阶段决策过程转化为一系列单阶段决策问题，Garruthers 和Battersby 最早将动态规划算法应用到资源受限项目调度的研究[7]，虽然求解结果较CPM 和 PERT 有较大的改进，但是仍然不能解决这类问题。分支定界算法在求解资源受限问题上，由于其计算效率和结果的优势被较多的学者研究。基本思想是：对满足当前约束的所有解空间进行搜索，将全部可行解空间分割成多个子集，再使用一定规则淘汰掉不可能产生最优解的子集，选择可能产生最优解的子集，来缩小搜索空间，从而找到最优解。Patterson 等提出基于紧前树的分支定界算法[8]，Demeulemeester 等通过引入延迟替代集来解决资源冲突[9]。使用精确性算法求解 RCPSP 问题比较适用于小规模问题，能在一定的时间内得到问题的精确解。但由于该问题是 NP-hard 问题，问题的求解时间和内存会随任务数目的增加而呈指数增长，当问题规模较大时，求解时间会太长，同时会出现内存不足的现象，无法得出调度结果。

**2.智能优化算法**

对于 RCPSP 中、大规模问题，无法使用精确性算法求解，通常使用智能优化算法来求解，可以在一个较短的时间内得到问题的次优解，下面具体讨论智能优化算法在项目调度中的应用。  
（1）遗传算法遗传算法是由生物学的进化规律演变而来的随机性搜索算法，Davis 首次将遗传算法应用到项目调度中[10]，解决了车间项目调度问题。Hartmann 使用任务列表编码[11]，提出了基于优化规则和随机性的遗传算法。刘士新以遗传算法为基础，设计一种基于定界策略的近似算法[12]，杨宏利结合任务存储的邻接矩阵，有效的解决编码中无效的任务调度现象[13]。  
（2）蚁群算法蚁群算法是以蚁群觅寻食物源最短路径为背景提出的智能优化算法，Dorigo 和Colorni 首先提出蚁群系统[14]，并将该算法首先成功的应用在旅行商问题。Merkle等将蚁群算法应用在项目调度中[15]，将蚂蚁走过的路径映射为调度方案，通过结合优先规则来选择任务。  
（3）粒子群算法粒子群算法是通过粒子间信息共享和协作来寻找最优解，Kennedy 等[16]在 1995年首先提出这种算法。Zhang[17]将该算法应用项目调度中，对基于任务列表和优先粒子两种情况，分别采用不同的进化策略求解。  
（4）模拟退火算法模拟退火算法是对局部搜索算法的改进[18]，Boctor 在 1996 年首次将该算法应用到 RCPSP 问题中，并将结果与禁忌算法相比较，结果显示该算法的实用性和有效性[19]。Cho 和 Kim 使用一个队列来表示一个调度方案，队列中的元素代表任务序号，通过模拟退火方法需找优先队列[20]。  
（5）禁忌算法禁忌算法通过对优化过程进行记录和选择，建立禁忌表，来避免陷入局部最优。Nonobe 和 lbarakiP 根据实际应用对 RCPSP 问题进行扩展，并使用禁忌算法Rollout算法求解问题[21]。Atli 分别使用禁忌算法和 CPLEX 软件求解 RCPSP 问题，结果表明禁忌算法在求解时间上有着明显的优势，CPLEX软件仅适合求解小规模问题[22]。

**3.Rollout算法**

Rollout算法内容比较丰富，主要分为：基于优先规则、局部搜索技术和元Rollout算法。其中基于优先规则的Rollout算法应用较广泛[23]，它通过一定的启发规则快速得到问题的解，但不保证解的质量。基于优先规则的Rollout算法主要由两个部分组成：进度生成机制和任务优先规则。进度生成机制是大多数Rollout算法的核心部分，根据扩展方式的不同，分为以任务为阶段变量和以时间为阶段变量两个类型，其中以任务、时间为阶段变量分别称为串行进度生成机制(SSGS)和并行进度生成机制(PSGS)[2]。Hartmann 等[24]对两种不同机制下调度问题进行研究，结果表明，当项目中任务比较多，PSGS 较优，而任务比较少时，则SSGS较优。由于PSGS的是非延迟进度机制，搜索空间少于SSGS，当任务比较少，使用 SSGS 搜索解与精确性偏差小，当任务较多时，使用 PSGS 能很快搜索问题的解空间。任务优先规则用于在项目调度中赋予任务优先权，在进度生成机制时基于任务优先权分配任务开始时间和结束时间。文献[25]分别提出最短工期、最长工期、最多紧后任务、最多后续任务、最大秩序权重、最早开始时间和最早结束时间六种优先规则。刘士新等[26]对众多优先规则进行研究，结果表明使用优先规则求解的效果与项目的内部结构有关，需要根据项目的参数特点来选择一个或多个优先规则组合对问题求解。由于进度生成机制和优先规则的多样性，Rollout方法可分为单次算法和多次算法。如果只使用一种进度生成机制和一种优先规则对项目进行调度，则称为单次算法；如果使用两种进度生成机制或多种优先规则对项目进行调度，则可以得到多个调度方案，并从中挑选较好的，则称为多次算法，多次算法调度结果优于单次调度算法[27]。

**POMDP 问题**

俄罗斯数学家马尔科夫于 1907 提出的马尔科夫决策过程，这类决策过程有一个共同的特性即为马尔科夫性，也称无后效性。它是指某阶段的状态一旦确定，则此后过程的演变不再受此前各状态的影响。具体地说，如果一个问题被划分各个阶段之后，后一个阶段中的状态只受前一阶段的影响，与其他状态没有关系，且是由前一阶段的状态通过状态转移方程得来的。MDP 是基于决策理论的规划方法中应用最多的模型。它描述了决策节点与环境相互作用的过程。  
POMDP 引入了信念状态这一概念，在信念状态具有马尔科夫性，同时由于信念状态空间的连续n维性，使得 POMDP 的求解更加困难。但是，POMDP 是在MDP 基础上扩展的一个更一般化的模型，它能够很好地对环境、动作和观察的不确定性进行建模，相对于 MDP 更贴近于现实情况，具有更广泛的应用。所以，从POMDP 模型提出至今，一直都得到了各个领域学者们的广泛关注，先后产生了很多有用的技术，以解决不确定环境下的决策与规划问题。POMDP 算法研究现状。为了快速高效准确的求解 POMDP 问题，从最初的精确求解算法到后来的近似求解方法，先后出现了很多的求解算法。POMDP 的求解算法可以按照前向或后向分类，也可按照精确求解和近似求解分类。本文按照后者来进行分类介绍。1971 年 Sondik 在其博士论文中提出的一次合格算法拉开了精确求解 POMDP的序幕。随后出现了一系列的精确求解算法，例如 Monahan 的算法，线性支撑算法，目击算法，增量剪枝算法等。由于 POMDP 精确求解的困难性，以精确算法为基础，研究高效的近似算法将是解决 POMDP 问题的重要方向。文献[5]总结了一些近似算法，例如网格方法，有限历史方法，Rollout方法，因子化信念状态分解方法，神经网络方法等。这些方法大部分都是 2000 年以前的文献中出现的。2000 年至今，POMDP 算法的研究仍在继续。下面按照时间顺序仅列举每年出现的比较重要的方法，基于点的 POMDP 求解方法 PBVI[6]于 2003 年提出，开启了基于点的 POMDP 方法的历程，至今基于点的方法都是求解 POMDP 相对最有效的方法；04 年提出的新的Rollout搜索方法求解 POMDP[7]；05 年基于点的方法有了新的重要发展，提出了 Perseus[8]方法；06 年的混合 POMDP 算法[9]；07 年的AEMS[10]，Forward search value iteration[11]，基于点策略迭代[12]等；08 年基于点的另一个重要方法被提出，即 SARSOP[13]，同时文献[14]提出的在线求解方法也是一个重要的方法；2009 年文献[15]通过对信念空间分解或压缩来求解 POMDP；2010年文献[16]使用局部逼近的方法求解高维连续 POMDP 问题，文献[17]用 KaczmarzIterative Method 进行 POMDP 值函数的剪枝，以及通过对信念空间的聚类或压缩来实现 POMDP 的快速求解[18]，另外还有 Density Projection[19]方法，在线方法 AnOnline Algorithm for Constrained POMDPs[20]等等。随着 POMDP 求解方法的不断发展，其应用研究也得到了广泛关注。POMDP越来越被应用于重要领域，文献[21]总结了 1998 年之前 POMDP 的一些应用研究。但是，此后随着研究的不断深入，POMDP 的应用得到了更加迅速地发展，主要包括以下几个领域。机器人领域一直是POMDP的一个重要应用领域，如文献[22]将Layered POMDP应用到基于视觉的移动机器人的场景分析；文献[23, 24]将混合可观察的 POMDP 应用到不确定环境下机器人任务规划，用基于点的方法求解因子化的混合可观察POMDP 模型；多机器人协同[25, 26]；机器人的视觉行动[27]。在导航方面的应用，文献[28]就是利用 POMDP 解决不确定环境中的导航问题；文献[29]通过简化状态空间的方法应用于机器人导航。动作规划（Motion Planning）：Yanzhu Du 等人在文献[30, 31]利用 POMDP 进行UAV 动作规划。POMDP 在其他一些领域也得到了广泛应用，文献[32]利用 POMDP 建立智能教学系统；辅助能源管理[33, 34]；口语对话系统[35]；老年人辅助系统[36]等。从 POMDP 的发展过程总结可见，十多年前最好的 POMDP 算法也只能够求解仅有几十个状态的 POMDP 问题。五年前，基于点的算法则能够求解大概具有 900个状态的 POMDP 问题，这可以称得上是 POMDP 求解规模上的一个很大进步。现在，具有几百个状态的POMDP问题可以在很短的时间内得到解决[23]。正是POMDP算法的不断发展，带来了其更加广泛的应用。但 POMDP 求解尚存在一些基本问题需要解决：虽然 POMDP 范式比较广义，但仍需要进一步的扩展研究；虽然 POMDP 的新算法层出不穷，但有效地解决大规模实际 POMDP 问题的方法还有待探索，等等。与此同时，随着新一代智能系统的发展，更大规模的规划问题将越来越普遍，给 POMDP 提出了一些新的挑战，因此，本文对在随机迭代过程的基础上进行进一步探索，希望本文所作的工作能够为大规模 POMDP 问题的求解做出一定的贡献，并能在动态不确定的、结构型关系的智能系统中得到很好的应用。

**粒子滤波算法**

国外对粒子滤波的研究起步较早。早在二十世纪五十年代Hammersley等人就提出一种被称为Sequential Important Sampling(SIS)的方法。到了六十年代后期Handschi等将SIS法应用于控制领域。七十年代各个领域的学者继续沿着SIS的思路研究，在这以后一系列改进的SIS算法[1 ,2 ]相继出现。但是，SIS算法容易导致粒子退化现象(Particle Degeneracy)，影响了它在实际中的推广应用。直到1993 年， Gordon 等人提出了采样重要性重采样算法 (Sampling importanceResampling, SIR)[ 3]，才基本解决了粒子退化问题。从此，粒子滤波又被广泛关注，并取得了重大进展，提出了一些重要的SIR算法。如，多项式重采样算法(Multinomial Resampling)[4 ]，分层重采样算法(Stratified Resampling)[5 ]，残差重采样算法(Residual Resampling)[6 ]，系统重采样算法(Systematic Resampling)[7 ]等，文献[8]详细介绍了重采样及相关算法，文献[9]对重采样模式进行了比较。由于SIR算法是对权值较大的粒子进行多重复制，造成粒子多样性损失，最终仍然可能出现粒子退化问题。文献[10~14]对重采样算法进行了分析研究，做了一些改进。国内对粒子滤波的研究开始较晚。但是许多大学和科研院所都对其十分关注，并进行了相关应用与理论研究。在粒子滤波理论方面，文献[15~17]介绍了粒子滤波基本理论和国内外最新进展；在粒子滤波的改进方面，文献[18]提出了一种使用非等权值粒子的确定性粒子滤波算法，文献[19] 提出一种扩展卡尔曼粒子滤波算法的修正方法；在粒子滤波的应用方面，文献[20]将粒子滤波应用于轮廓线跟踪，文献[21]应用于行人跟踪，文献[22]用粒子滤波在闪烁噪声环境下进行目标跟踪，文献[23]讨论粒子滤波在混合状态与参数估计中的应用，文献[24，25]将粒子滤波用于被动定位跟踪。目前国内对粒子滤波的研究水平与国外相比尚有较大差距，但各相关领域的学者都在孜孜不倦的研究探讨，相信会逐渐接近并超过国外的研究水平。

**研究目标和内容**

1. 基于POMDP的多目标跟踪雷达波束调度建模
2. 基于短视策略的多目标跟踪雷达波束调度方法
3. 基于动态规划的多目标跟踪雷达波束调度方法
4. 基于Rollout的目标跟踪雷达波束调度算法

**技术路线**

1. 对国内外相关经典文献进行调研、分析、整理；
2. 分析多目标跟踪雷达波束调度的状态空间、行动空间、量测空间、状态转移函数与观测函数，将目标状态后验概率分布作为置信状态，在雷达波束使用代价约束下，以跟踪精度作为待优化目标，建立基于POMDP的波束调度模型；
3. 假设目标为匀速直线运动，量测在雷达坐标系下，无杂波，检测概率不为1，采用粒子滤波估计目标状态，采用概率数据关联方法解决量测来源不确定问题，对2中所建立的待优化问题，采用贪婪算法计算针对不同目标应该选择的波束；
4. 假设如3，针对非短视下的调度问题，基于动态规划方法，编写Matlab仿真程序，给出小规模问题下的最优解；
5. 假设如3，进一步分析雷达波束调度问题，选取基策略，给出对应的Rollout算法，从理论上分析Rollout算法所能达到的性能及计算时间/空间复杂度，编写Matlab仿真程序，在算法性能、计算量等方面与短视策略、动态规划算法进行比较分析并给出算法结论。

**论文组织**