基于服务质量的同步问题雷达资源管理

Tobias M¨uller、Sebastian Durst、Pascal Marquardt 和 Stefan Br¨uggenwirth弗劳恩霍夫高频物理与雷达技术研究所¨*FHR*瓦希特贝格，德国
tobias.mueller@fhr.fraunhofer.de、
sebastian.durst@fhr.fraunhofer.de+49 228 9435-79019

arXiv:2303.01872v1 [eess.SP] 3 Mar 2023

摘要——**智能雷达资源管理是任何现代雷达系统的重要组成部分。基于服务质量的资源分配模型（Q-RAM）为深入且可量化的决策提供了一个框架，但无法表示任务间依赖关系，例如跟踪任务和同步任务中可能出现的依赖关系。因此，同步通常以固定且非最优的模式执行。我们提出了 Q-RAM 的一种扩展，使资源分配能够考虑复杂的任务间依赖关系，并生成自适应且智能的同步方案。所提供的实验结果表明，与传统策略相比，该方法有显著改进。**

索引词—**雷达，资源管理，认知雷达，同步，服务质量**

I. 引言

资源管理（即任务优先级划分、资源分配和调度）是任何现代雷达系统的重要组成部分，因为雷达系统必须同时执行可能相互冲突的功能；对于任何认知系统而言，这一点尤为重要。资源管理的一项重要职责是从众多任务配置中选择运行参数。这些任务配置的资源需求和所产生的效用各不相同，目标是在资源约束下优化整个系统的性能。描述这一问题的数学框架称为基于服务质量的资源分配模型（*Q-RAM*） [1], [2]。

双基地或多基地雷达日益普及，原因有多种，其中包括避免死区时间、接收机可能实现隐蔽运行，以及在军事环境中具备更强的韧性。多基地雷达要正常工作，接收机必须知道各发射机的位置，且所有传感器都必须共享统一的时间和频率标准。这对于准确估计距离和速度至关重要。因此，各传感器中使用的敏感本地振荡器必须保持同步 [3]。时钟不同步会导致测量误差增大，进而降低整个系统的性能。资源管理器需要将这些影响纳入考量，以确保资源得到最优分配，并制定智能的同步调度计划。这对于现代和未来的多功能系统尤为重要，因为这些系统会在同一孔径上执行各种功能，即同步过程本身会与其他任务竞争共享资源。在许多情况下，多基地距离测量被认为采用基于 GNSS 的同步 [4]。然而，这会造成不必要的依赖，尤其是在敌对环境中，因此在某些情况下，采用独立于 GNSS 的同步方法更为可取。

标准 Q-RAM 框架无法恰当地对同步的影响建模，因此无法支持复杂的决策。我们提出对该框架进行修改，使其适用于需要专门同步机制的多基地系统。此外，我们还提供了实验结果，表明该方法显著优于传统策略。

值得注意的是，当需要定期校准以确保其他任务的质量水平时，所提出的算法也适用于雷达同步以外的场景。具体而言，IMU校准以及汽车应用场景中的信道感知也属于这种情况。

本文的组织结构如下。第二节和第三节分别简要讨论Q-RAM问题及其经典解决方案。第四节介绍所提出的扩展框架和算法，以增强Q-RAM的同步能力。实验验证见第五节，其中包括对仿真环境的详细描述，以及对雷达和目标规格、假定的同步特性和测量特性的说明。最后，本文在第六节作出总结。

II. Q-RAM问题

本节将简要介绍 Q-RAM问题。多功能雷达中的资源分配模块旨在通过选择效用，为一组雷达任务最大化其操作参数 （例如波形、驻留时间或跟踪滤波器的选择），同时遵守某些资源约束 （例如雷达带宽、功率），并考虑环境条件，即态势数据。操作参数的特定选择与环境条件共同决定任务的（预期）质量 ，该质量通常与任务类型相关，并便于用户进行更直观、易于理解的控制。质量和态势数据进而定义任务效用。对于 $\{\tau_1, \ldots, \tau_n\}$ 一组雷达任务，

前两位作者对本项工作的贡献相同。

k种资源及其资源界限 R_1、……、 R_k以及环境条件 e，该问题可表述为

$$\max_{\phi=(\phi_1,\ldots,\phi_n)} u(\phi, e) \tag{1}$$

$$\text{s.t. } \forall j = 1, \ldots, k \quad \sum_{i=1}^{n} \big(g_i(\phi_i)\big)_j \leq R_j, \tag{2}$$

其中， ϕ_i 是任务 τ_i的配置， u 是系统效用，而 g_i 函数将任务配置映射到其资源需求（有关更详细的说明，请参见 [5]）。

III. 经典方法

本节将简要介绍 [1],[2]提出的 Q-RAM问题近似求解策略。 [6]中给出了一种值得注意的替代方法。首先，针对每个任务生成并评估所有可能的任务配置，即计算其产生的效用和资源需求。对于多种资源的情况，会使用一种标量代理量，称为复合资源。随后，预先选出一组在不同资源水平下效用较高的配置，并按复合资源需求递增的顺序存入列表，我们将其称为作业列表。所有任务的作业列表都会交给全局优化器；在资源充足的前提下，该优化器会迭代地将资源分配给效用资源比最高的任务。如果某个任务被选中并获得额外资源，我们就称该任务已升级。完成资源分配后，调度器会对选中的作业（即已选定配置的任务）进行调度。

IV. 所提出的框架与算法

经典的 Q-RAM 方案无法对复杂的任务间依赖关系进行建模，即一个任务的质量不能取决于同一规划周期内为另一个任务所选配置的预期质量。然而，在同步和校准场景中，这些依赖关系确实存在且十分重要。更具体地说，同步质量会显著影响跟踪任务的质量，因为它会改变测量精度。此外，同步任务通常被认为没有自身固有的效用，而是通过提高其他任务的质量来提升系统效用。显然，在这些情况下仍然执行 Q-RAM 有一种简单的方法。

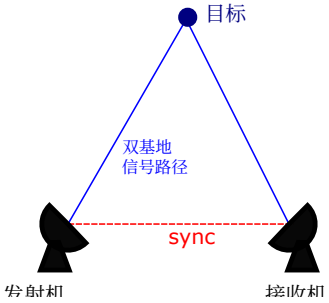

图 1：双基地配置。

也就是说，退回到固定的同步计划，从而不再对同步本身进行优化（参见图2顶部一行）。不出所料，这通常无法实现最优的资源分配。

我们提出了 Q-RAM 的一种扩展，使其能够资源管理器提供自适应且智能的同步方案。为此，考虑如图1所示的通用双基地雷达系统。发射机必须定期向接收机发送通信信号，以建立无GNSS时间同步。这一过程耗时，并会占用孔径，使其无法执行其他任务。因此，只有在必要时才应执行该过程，但执行频率也必须足够高，以免降低其他任务的质量。假设在固定的规划周期内有多种不同的同步方案 s_1、……、 s_n 可供选择。每种方案都具有相应的同步资源需求 r_1、……、 r_n。目标是选择总体系统效用最高的方案。最简单的形式是：对于给定规划周期，二元决定是否执行（s_1）同步任务，或不执行（s_2）同步任务，此时 $r_2 = 0$。对于给定的s_i，我们计算同步质量及其对其他任务预期效用的影响，从而能够对效用函数进行非平凡的重新设计。利用这些结果，并将可用资源预算减去 r_i，即可照常执行用于分配资源的Q-RAM算法。针对所有 i 执行上述过程，并在给定的规划周期内，选取总体系统效用最高的方案s_i 。在下一个规划周期内，重复这一过程。这样便建立了动态同步模式，能够自适应地考虑待执行的其他任务的存在情况和性质，以及当前环境。二元选择的过程如图2所示。

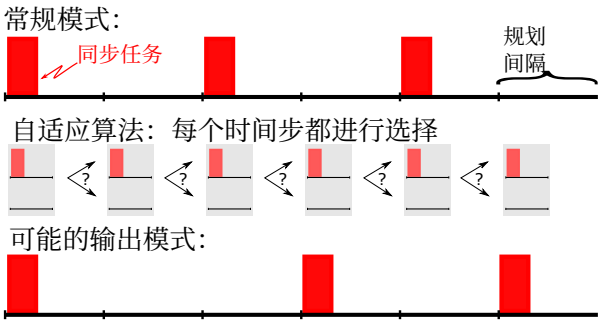

图 2：常规同步方案与自适应同步方案。

请注意，由于与不同同步方案对应的 Q-RAM优化彼此独立，所提出的算法在并行执行时不会增加计算时间。

V. 实验验证

我们通过以下场景中的仿真展示所提出的算法的有效性。该雷达系统为双基地系统，由一台发射机和一台接收机构成，并需要主动时间同步。在 60 秒的时间段内，数量不断增加的目标飞过其视场。

该系统的目标是获取并跟踪这些目标。雷达和目标的位置如图 3 所示。为进行验证，我们通过使用 Fraunhofer FHR 的认知雷达仿真器（CoRaSi）进行蒙特卡罗仿真，将我们的算法与采用各种固定同步调度计划的 Q-RAM 以及一种经典的基于规则的方案进行比较。

A. 雷达和目标规格

假设主动雷达配备固定式有源电子扫描阵列天线，最大探测距离可达 350 km，并将发射能量聚焦于搜索围栏内；搜索围栏在方位角方向的开口角为 $\pm 40°$，仰角为 5°。目标以 800 ms^{-1} 至 1300 m s^{-1} 的速度穿过搜索围栏。对于位于搜索波束中心、雷达散射截面为 1 m^2 且距离为 300 km 的目标，其信噪比为 10 dB。在没有其他负载的情况下，雷达需要 10 s 才能完成一次搜索围栏的全面更新。通往无源系统的直接传输线路会受到 120 dB 的衰减（例如由地形造成），因此需要较长的积分时间才能使两个系统同步。接收机采用数字波束形成，以独立于发射机。

使用以下（双基地）雷达方程计算接收信号的信噪比

$$\frac{P_{\mathrm{tx}} I c G_{\mathrm{tx}} G_{\mathrm{rx}} \sigma \lambda^2 L}{(4\pi)^3 R_{\mathrm{tx}}^2 R_{\mathrm{rx}}^2 k T B n_f} \tag{3}$$

其中，P_{tx} 表示峰值功率，I 表示积分脉冲的数量，c 表示压缩比，G_{tx} 和 G_{tx} 分别表示发射端和接收端的增益值，σ 表示雷达散射截面，λ 表示波长，n_f 表示噪声系数，L 表示系统损耗，kTB 表示热噪声。范围 R_{tx} 和 R_{rx} 分别表示位于 $p \in \mathbb{R}^3$ 处的目标到发射机和接收机的距离。需要注意的是，增益还至少会通过阵列因子和电子波束扫描间接取决于目标位置 p。当针对接收机计算雷达方程时，L 还包含由雷达波形的通信部分导致的滤波器失配所引起的额外3dB损耗。

B. 同步与测量描述

本节介绍有源和无源传感器的测量模型及其同步方法。它

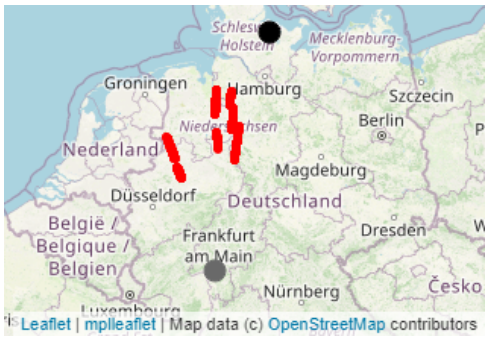

图3：场景概览。图中显示了发射机（灰色）、接收机（黑色）和目标轨迹（红色）。

假设有源雷达能够以经典方式发射和接收自身的波形，但它会发射一种包含传输时间戳的特殊波形。无源传感器也能够接收此波形并对其进行解码，从而重建时间戳。

两个传感器各自拥有独立的时钟，这些时钟可能存在偏差；但为简单起见，我们将发射机的时钟定义为理想时钟，并将误差仅归因于接收机一侧（主从系统）。经过 N 秒后的时钟漂移建模为随机游走：

$$\Delta T = \sum_{i=1}^{N} Z_i, \qquad Z_i \sim \mathcal{U}(-d, d), \quad d > 0. \tag{4}$$

这定义了漂移的离散版本，并通过线性插值来模拟相应的连续扩展。请注意，误差 ΔT 与从发射机到目标再返回接收机的距离测量误差 ΔD 成正比，因此会直接影响跟踪误差。由于常见的跟踪器要求测量值采用球坐标，我们将原始双基地测量转换为单基地测量。因此，使用三角关系将从发射机到目标再返回接收机的距离 $D(p)$转换为从目标到接收机的距离 $R(p)$。由于发现雅可比矩阵的线性一阶近似会导致卡尔曼滤波器不稳定，因此采用蒙特卡罗积分法计算相应的协方差变换。角度测量标准差建模为

$$\sigma_x = 0.628\,\theta_x / (2\sqrt{\mathrm{SNR}}), \quad x \in \{a, e\}, \tag{5}$$

其中，θ 分别表示方位角和仰角方向上的3dB波束宽度。假定距离误差标准差已知且固定。

C. FHR 认知雷达仿真器 *CoRaSi*

Fraunhofer FHR 的认知雷达仿真器（CoRaSi）是一款采用 Java 编写的多用途软件仿真器，适用于具备电子波束扫描功能的相控阵雷达。该仿真器由德国国防部通过基础经费资助开发，可对不同频段、旋转或静止状态下的雷达系统进行实时分析，并支持任意天线方向图和搜索策略。仿真涵盖了搜索、跟踪、目标分类、资源管理以及多传感器数据融合等最重要的功能。CoRaSi 最初是为配备有源电子扫描阵列天线的地面多功能雷达开发的，如今也能够仿真舰载和机载系统。若仿真涉及多个传感器，则可采用不同的融合概念（集中式、分布式、混合式）来整合信息。凭借其灵活性，CoRaSi 能够根据给定参数分析多种相控阵雷达。

该仿真还可用于分析威胁轨迹。仿真会为每个目标生成检测结果，并考虑视角相关的雷达散射截面。还会根据传感器

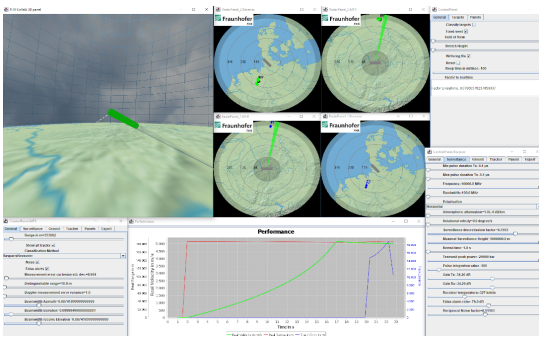

图 4：CoRaSi 的图形用户界面。

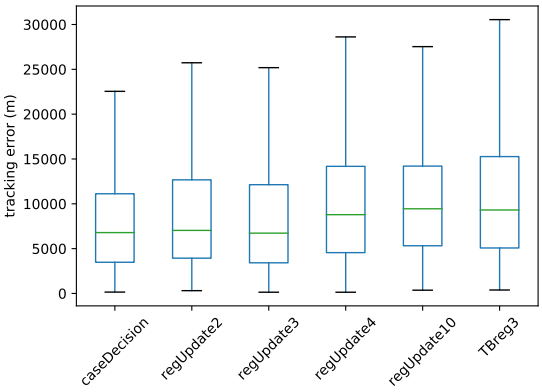

图 5：不同同步方案的跟踪性能对比。箱线图显示中位数（绿色）。

参数生成虚警，从而实现逼真的目标检测仿真。CoRaSi 提供可选的三维图形用户界面，支持运行时自适应和关键参数评估，并提供完善的日志记录方案，以便进行后续仿真分析（参见图4）。

D. 实验结果

我们在上述场景中，将所提出的算法（在表格和图中称为 *caseDecision*）与常规 Q-RAM 进行了比较。常规 Q-RAM 采用 1 至 4 秒以及 10 秒的固定同步模式（分别称为 *regUpdate1* 等）；此外，还与采用时间均衡调度的基于规则的方法（参见 [7]）进行了比较，该方法的期望同步周期为 3 秒（称为*TBreg3*）。所有基于 Q-RAM 的方法均采用长度为 1 秒的规划间隔。对于 caseDecision，同步决策为二元决策。该算法可决定在任意给定的规划间隔内是否执行一项持续 231 毫秒的同步任务。请注意，由于系统无法使用 1 秒的固定同步间隔获取并跟踪所有目标，因此下文不再考虑 regUpdate1。

我们的算法表现最佳，跟踪误差中位数为 6726.4m，而次优方案为 6954.9m。另一方面，平均误差降低了 15 %（8121.5 m 对比 9520.8m），这是显著的改进。此外，我们的算法表现出最稳定的跟踪性能，跟踪误差的标准差远低于其他算法。同时，最大跟踪误差平均降低了 22 %，

表I：各分配策略的跟踪误差关键数据。结果为5次仿真运行次数的平均值。

	中位数	min	max	mean	标准差
caseDecision	6726.4	410.3	29711.9	8121.5	5758.2
regUpdate2	7526.0	440.6	43131.8	10185.8	8790.4
regUpdate3	6954.9	267.8	38133.3	9520.8	8089.9
regUpdate4	8452.8	367.7	44974.2	11362.2	9382.6
regUpdate10	9299.9	671.0	42533.1	11273.5	8036.7
TBreg3	9942.7	636.5	44276.6	12151.2	9149.9

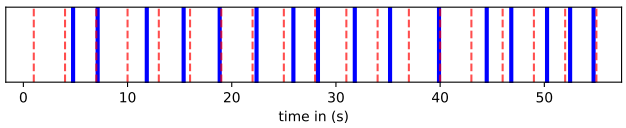

图6：单次仿真中的同步调度计划：常规方案（红色）和自适应方案（蓝色）。

与次优表现相比。与预期一致，其余基于 Q-RAM 的方法均优于基于规则的方法 TBreg3。详细结果见表I和图5。

自适应算法可生成灵活的同步调度计划，实现更好的负载均衡并减少跟踪误差。图6展示了其中一个生成的调度计划。

VI. 结论

本文介绍了对基于 Q-RAM 的雷达资源管理架构的扩展，使雷达系统能够智能地调度同步任务，从而确保系统整体性能达到最优。此外，文中指出，所提出的算法也适用于雷达同步以外的场景。所提供的实验结果表明，自适应同步方案在仿真中效果显著，性能明显优于较为传统的同步方案（采用常规更新率）。未来的研究将关注该方案在相干分布式MIMO网络亚纳秒级相位同步中的实现。总体而言，本文提出的方法是迈向真正认知雷达系统的重要一步。

参考文献

[1] R. Rajkumar、C. Lee、J. Lehoczky 和 D. Siewiorek，“面向 QoS管理的资源分配模型”，载于《*IEEE*实时系统研讨会论文集》，1997年，第298–307页。[2] S. Ghosh、R. Rajkumar、J. Hansen 和 J. Lehoczky，“具有多资源约束的 QoS 感知型集成资源管理与调度”，《实时系统》，第33卷，第7–46页，2006年。[3] Y. Yang 和 R. S. Blum，“相干 MIMO 雷达的相位同步：算法及其分析”，《*IEEE*信号处理汇刊》，第59卷，第11期，第5538–5557页，2011年。[4] S. Prager、M. S. Haynes 和 M. Moghaddam，“分布式超宽带软件定义雷达网络的无线亚纳秒级射频同步”，《*IEEE*微波理论与技术汇刊》，第68卷，第11期，第4787–4804页，2020年。[5] S. Durst 和 S. Br¨uggenwirth，“利用深度强化学习进行基于服务质量的雷达资源管理”，载于《*2021*年*IEEE*雷达会议（*RadarConf21*）》，2021年，第1–6页。[6] A. Charlish，“多功能雷达资源管理的自主智能体”，博士学位论文，伦敦大学学院，伦敦，2011年。[7] J. Butler，“多功能雷达中的跟踪与控制”，博士学位论文，伦敦大学，伦敦，1998年。