一种面向软件定义网络启用的 DDS 无人机互联网通信的反应式跨层 QoS 适配框架

Mohamed Ali Zormati波尔多国立高等工程技术学院`波尔多国立高等工程技术学院`法国国家科学研究中心，*Heudiasyc UMR 7253*Compi`egne，法国
mohamed-ali.zormati@hds.utc.fr

Ghada Jaber波尔多国立高等工程技术学院`波尔多国立高等工程技术学院`Compi`法国国家科学研究中心，Heudiasyc UMR 7253，法国 ghada.jaber@hds.utc.fr

Hicham Lakhlef波尔多大学，法国国家科学研究中心，波尔多国立高等工程技术学院，*LaBRI UMR 5800*塔朗斯，法国
hicham.lakhlef@labri.fr

arXiv:2611.30223v1 [cs.NI] 23 Nov 2026

摘要—**无人机互联网（IoD）是物联网（IoT）的一个子集，其中无人机作为联网智能对象运行，与跨越陆地、空中和空间域的实体进行通信。无人机部署的不断增加推动了无人机互联网在主流和新兴应用中的采用。如今，无人机互联网系统越来越多地依赖标准化的数据分发服务（DDS）作为其通信中间件，这得益于其丰富的服务质量（QoS）策略，能够满足无人机互联网应用的严格约束。然而，QoS策略，尤其是可靠性模式，通常采用静态配置，这限制了其在无人机互联网环境中的有效性，因为此类环境具有高移动性、频繁的网络性能下降以及动态拓扑变化等特征。本文提出了一种面向基于 DDS 的无人机互联网系统的反应式 QoS 适配框架。该框架利用软件定义网络（SDN）捕获全局网络状况，并结合设备能量水平和主题流行度，根据运行环境的变化动态调整可靠性模式。通过综合考虑网络层、设备层和主题层输入，所提出的方法增强了中间件适应性、可靠性和效率。仿真结果表明，与静态 QoS 配置相比，所提出的框架具有更好的有效性。**

索引词—**无人机互联网（IoD）、数据分发服务（DDS）、软件定义网络（SDN）、服务质量（QoS）、跨层自适应。**

I. 引言

无人机互联网（IoD）是一个快速发展的范式，将物联网（IoT）扩展至空中域 [1]。无人机互联网将地面、空中和空间网络互联起来，从而将无人驾驶飞行器（UAV）从孤立的系统转变为空中智能体，使其具备智能感知、计算和通信能力。这使得一系列应用成为可能，其范围超越了陆地物联网 [2]。无人机互联网涵盖应急响应、电信基础设施支持等主流应用，也支持空天地一体化网络（SAGINs）等其他新兴技术。鉴于无人机互联网的有效性在很大程度上取决于其通信能力，因此，开发能够在其持续发展过程中支持无人机互联网运行的可靠且高效的通信框架至关重要 [3]。然而，无人机自身的固有限制（如高机动性和资源有限）以及无线链路的不稳定性，使这一目标面临挑战 [4]。

越来越多的无人机互联网系统依靠标准化的数据分发服务（DDS）作为其通信中间件 [5]，这得益于其以数据为中心的发布/订阅模型设计、丰富的QoS策略和分布式架构 [6]。近年来，已有多项研究探讨了DDS在无人机互联网中的应用，凸显了其在实时协同和可扩展数据分发方面的适用性 [7]。然而，现有大多数研究依赖静态QoS配置，而无人机互联网环境具有高度动态的条件，这对静态配置提出了挑战 [8]。尽管DDS提供了丰富的QoS支持，静态配置仍无法应对网络波动和网络损伤 [9]。因此，利用网络层状态进行动态QoS自适应变得至关重要。

为了实现面向动态服务质量自适应的网络级输入，有必要考虑网络软化技术，主要是软件定义网络（SDN）。SDN能够提供底层无人机网络的全局可见性，并实现动态的全网控制 [10]。SDN与DDS的结合已被用于提升后者的实时性能 [11]，以及自动化DDS在时间敏感网络（TSN）上的确定性部署 [12]。DDS与SDN的结合为受限网络 [13]，（例如无人机互联网）提供了所需的灵活性。

尽管人们已开展多项工作来增强DDS，以满足无人机互联网的严格要求，但据我们所知，尚无已有研究针对无人机互联网场景下的DDS提出基于SDN的跨层QoS自适应框架。为弥补这一空白，我们提出了一种新型框架，该框架能够根据动态调整DDS的QoS配置
网络层、设备层和主题层输入。与通用自适应框架不同，所提出的解决方案通过基于软件定义网络的监控纳入全局网络状况，同时考虑设备能量水平和主题流行度。基于这些输入，该框架动态调整DDS可靠性模式，以提升通信可靠性和效率。

本文其余部分安排如下。第二节回顾相关工作。第三节介绍系统模型，第四节描述所提出的自适应解决方案。第五节介绍实验结果。第六节总结全文。

© 2026年。仅供个人使用。已发表版本见 doi: 10.1109/WiMob70978.2026.11777854。

II. 相关工作

DDS 由对象管理组（OMG）标准化 [14], ，凭借其灵活的以数据为中心的发布/订阅架构以及全面的服务质量支持 [6]，已越来越多地应用于无人机互联网系统。DDS 提供了 22 项服务质量策略，可对数据传播的多个方面进行细粒度控制，包括可靠性、时延、持久性和数据可用性 [15]。这些策略可在主题、发布者/订阅者以及数据写入者/读取者层面进行配置。仅当相应的 QoS 设置兼容时，通信才会建立。

已有多项研究探讨了基于数据分发服务的系统中的运行时服务质量自适应，以改善系统在复杂运行条件下的行为。在 [9], 中，作者提出了一种监控驱动的服务质量优化器，用于观测 DDS 运行时事件并迭代调整服务质量配置文件。在 [8], 中，研究者引入了一种模型驱动框架，通过受约束模板实现 DDS 服务质量的安全运行时自适应，在适应波动资源的同时确保参与者之间的兼容性。 [16] 中的作者对 DDS QoS策略的语义及其相互依赖关系进行了形式化定义。尽管这些工作表明 DDS 服务质量参数可以在运行时进行调整，但它们依赖于中间件或配置层面的机制以及局部观测，未纳入全局网络上下文或跨层输入。

为实现网络感知服务质量执行，已有多项研究探索了 DDS 与软件定义网络的集成。在[13],中，作者提出了一种组合式架构：DDS 将应用层服务质量要求传递给 SDN 控制器，后者据此配置网络资源。在 [11], 中，研究者引入了一种基于软件定义网络的解决方案，在网络层执行 DDS QoS要求。 [12]中的作者进一步将这种集成扩展到确定性 TSN 环境。尽管这些研究凸显了网络可编程性的优势，但它们将 DDS 服务质量配置视为静态输入，由网络执行 QoS策略，而不是在中间件层面进行动态自适应。

在受限环境中，能量感知通信至关重要。在 [17], 中，作者提出了一种能量感知 DDS 中间件，结合本地能量模型来降低通信开销。同时，其他研究（如 [18], ）表明，数据传播成本会受到主题流行度的显著影响。尽管这些研究突显了能效和流行度感知的重要性，但它们是分别考虑这些因素的。

据我们所知，尚无先前研究提出一种运行时 DDS 可靠性自适应方法，能够联合考虑通过软件定义网络实现的全局网络感知、设备级能量约束和主题流行度。本研究通过引入一种跨层、软件定义网络辅助的 DDS 可靠性自适应框架，弥补了这一空白。该框架根据网络层、设备层和主题层输入动态调整 DDS 服务质量可靠性配置，旨在提升通信可靠性和效率。

III. 系统模型

我们考虑一个基于 DDS 的无人机网络，该网络由一组无人机 D 组成。我们将无人机 i 与 j 之间的无线链路记为 l_{ij}，其中 $i,\ j \in D$ 和 $l_{ij} \in L$， L 表示可用无线链路的集合。此类无人机网络同时受到能量约束和通信可靠性挑战的影响：前者源于电池供电无人机，后者则源于不可靠的无线链路。

为确保任务成功，无人机通过不同主题交换信息 $\tau \in T$，其中 T 表示主题集合。每个主题都关联特定的服务质量要求。为便于说明，我们重点关注 DDS可靠性模式，该模式可配置为 {BEST_EFFORT, RELIABLE} [14]。可靠模式通过确认和重传确保消息送达，但代价是更高的时延和资源占用；而尽力而为模式不提供任何保证，但优先考虑低时延和低开销。

对于某些关键主题，例如安全与控制信息（如紧急返航指令），必须确保可靠传输，以保障安全运行。相反，高速率主题（如实时视频流）更适合采用尽力而为传输，因为这类主题优先考虑信息的新鲜度而非完整性。最后，有些主题传递的信息虽然重要，但并非安全关键信息（如遥测）。如图 1 所示，这些主题适合进行动态适应：在条件良好时采用可靠传输，在条件恶化时则切换为尽力而为传输。

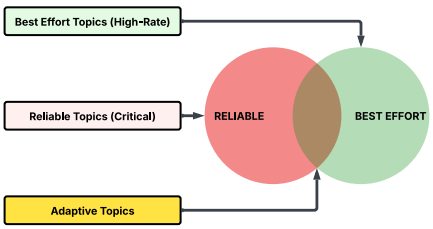

图 1. 基于可靠性的主题分类

软件定义网络可全局查看底层无人机网络的状态（例如拓扑、链路状态、拥塞等），并实现动态的全网控制 [10]。我们采用集中式软件定义网络架构，其中控制器属于地面控制基础设施 (GCI)，以实现全网监控。每架无人机均作为支持软件定义网络的转发节点运行，能够接收控制器下发的流规则并报告本地链路指标。我们假设采用带外控制平面，无人机与 GCI 之间的控制流量通过专用无线链路传输 [19]。

我们提出了一种跨层、由SDN辅助的反应式QoS适应框架，用于基于DDS的无人机网络通信。该框架根据网络级条件和设备级约束（例如可用能量）动态调整自适应主题的可靠性模式，从而提高通信可靠性和效率。所提出的模型还考虑了主题流行度，因为它会直接影响网络负载和设备能耗。适配在

© 2026年。仅供个人使用。已发表版本见 doi: 10.1109/WiMob70978.2026.11777854。

主题级别执行，因为该级别能够捕获主题特有的特征，例如无法在链路级别表达的流行度。所提出的解决方案如图2所示。该框架作为SDN应用程序实现，并通过北向应用程序编程接口（API）与控制器交互。操作由QoS 适配框架计算，并在SDN 控制器的协调下，通过每架无人机上的DDS QoS 代理执行。

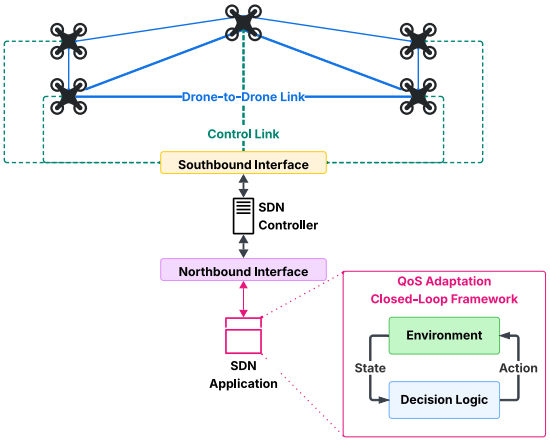

图2. 提出的服务质量适配框架

IV. 提出的适配方案

所提出的服务质量适配框架会监测运行环境并收集跨层系统状态，包括从软件定义网络获取的网络信息。基于这些状态，该框架在中间件层计算并执行适配决策，同时整合设备、主题和网络层面的输入。为形式化描述适配过程，我们定义系统状态空间、动作空间、用于权衡各项因素的目标函数，以及相应的优化问题。

A. 状态空间

状态空间涵盖会直接影响物联网无人机环境中 DDS 可靠性决策的网络、设备和主题条件。我们将主题 τ 在离散决策时段 k 的系统状态定义为：

$$\mathbf{s}_{k,\tau} = \left[L_k,\ C_k,\ E_k,\ P_{k,\tau}\right], \tag{1}$$

其中：

- **链路丢失率（L_k）：** 活动通信链路上观测到的丢包率。该网络级指标反映了底层无线链路的可靠性。
- **拥塞指标（C_k）：** 链路利用率（即负载）的度量。该网络级指标反映了可靠传输情况下发生拥塞放大的风险。
- **能量水平（E_k）：** 无人机的剩余电池电量状态。该设备级状态反映了能量约束。
- **主题流行度（$P_{k,\tau}$）：** 主题 τ 的活动订阅者数量。该主题级指标反映了主题流行度对可靠模式所引入开销的影响。

在 DDS 中，传播成本取决于链路条件和订阅者数量。在可靠模式下，确认和重传会引入开销，并且该开销会随订阅者数量增加而扩大；在基于集群的无人机互联网场景 [5]中，这种影响会进一步加剧。

主题 τ 在决策时刻 k 的瞬时流行度定义为：

$$N_{k,\tau} = \left|\mathcal{R}_{k,\tau}\right|, \tag{2}$$

其中，$\mathcal{R}_{k,\tau}$ 表示当前与主题 τ 匹配的订阅者（即 DDS 数据读取器）集合。为确保不同机队规模之间的可比性，流行度经归一化处理， [20]如下：

$$P_{k,\tau} = \frac{N_{k,\tau}}{N_{\max}}, \qquad P_{k,\tau} \in [0,1], \tag{3}$$

其中 $N_{\max}$ 表示预期最大订阅者数量（例如，最大集群规模）。

为降低对瞬时成员变动的敏感性，采用平滑后的流行度估计：

$$\bar{P}_{k,\tau} = (1-\lambda)\bar{P}_{k-1,\tau} + \lambda P_{k,\tau}, \qquad \lambda \in (0,1], \tag{4}$$

其中 λ 为平滑因子。

在本文余下部分中，$P_{k,\tau}$ 表示平滑后的主题流行度估计$P_{k,\tau}$。指标$P_{k,\tau}$ 可利用 DDS 发现机制与端点匹配信息计算。网络指标 L_k 和 C_k 是从 SDN 控制器获得的路径级汇总值，而 E_k表示无人机的剩余能量状态。

B. 动作空间

动作空间表示 QoS 适配框架可执行的运行时中间件级适配集合。为清晰起见，在保持 DDS 标准合规性的同时 [14], , 我们重点关注应用于自适应主题的 DDS 可靠性模式。在每个决策时刻 k ，针对主题 τ，动作定义为：

$$a_{k,\tau} = R_{k,\tau}, \quad R_{k,\tau} \in \{\texttt{RELIABLE},\ \texttt{BEST_EFFORT}\}. \tag{5}$$

RELIABLE 模式可确保消息送达，但代价是更高的时延、带宽和能量消耗；而 BEST_EFFORT 则优先考虑低时延和低开销，但不提供任何保证。只有自适应主题会进行切换，安全关键主题则保留固定的 QoS 设置。各无人机上的 DDS QoS 代理负责执行这些操作。

C. 目标函数

目标是在当前运行条件下，为每个自适应主题 τ 选择一种 DDS 可靠性模式，以平衡通信性能与可靠性引致开销。可靠性决策按主题分别作出，而关键主题不进行自适应。

为在统一的决策框架内比较异构指标，所有状态变量均归一化至区间$\tilde{\ }$ $\tilde{\ }$ $\tilde{\ }$ $\tilde{\ }$ $[0,1]$,，得到 L_k、C_k、 E_k和$P_{k,\tau}$。每个状态变量均使用具有固定运行边界 [21]的最小–最大归一化方法归一化至区间 $[0,1]$ 。

© 2026年。仅供个人使用。已发表版本的数字对象唯一标识符为 doi: 10.1109/WiMob70978.2026.11777854。

具体而言，对于通用指标 x_k，其归一化过程如下：

$$\tilde{x}_k = \min\left(1,\ \max\left(0,\ \frac{x_k - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}\right)\right), \tag{6}$$

其中，$x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 分别表示 x_k预期运行值的最小值和最大值。

主题 τ 的瞬时成本表示在时段 k 为主题 τ 选择特定可靠性模式所产生的惩罚，其定义如下：

$$\begin{aligned} J(\mathbf{s}_{k,\tau}, R_{k,\tau}) = {} & w_L\, \tilde{L}_k\, \mathbb{I}[R_{k,\tau} = \texttt{BEST_EFFORT}] \\ & + \mathbb{I}[R_{k,\tau} = \texttt{RELIABLE}] \Big(w_C\, \tilde{C}_k + w_P\, \tilde{P}_{k,\tau} \\ & \qquad + w_E\,(1 - \tilde{E}_k)\Big) \\ & + \mathbb{I}[R_{k,\tau} = \texttt{RELIABLE}] \Big(w_{CL}\, \tilde{C}_k \tilde{L}_k \\ & \qquad + w_{PL}\, \tilde{P}_{k,\tau} \tilde{L}_k\Big) \\ & + w_S\, \mathbb{I}[R_{k,\tau} \neq R_{k-1,\tau}]\,, \end{aligned} \tag{7}$$

其中，$\mathbb{I}[\cdot]$ 表示指示函数。项 $w_L L_k$用于抑制在丢包率较高时采用尽力而为模式。选择可靠模式时，还会产生额外成本，以反映可靠性引致开销。具体而言，$w_C C_k$ 表示由重传导致的拥塞成本以及协议开销，$w_P P_{k,\tau}$ 则会对热门主题施加惩罚，因为可靠性开销会随订阅者数量增加；$w_E(1 - E_k)$则会抑制在能量受限的无人机上使用该模式。我们还考虑了丢包放大的可靠性开销（即重传风暴风险）。项 $w_{CL}\, C_k L_k$ 刻画了拥塞与丢包之间的耦合关系：丢包会触发重传，而拥塞会限制可用容量，可能导致重传风暴。同样，$w_{PL}\, P_{k,\tau} L_k$体现了对于热门主题，恢复流量会随丢包率和订阅者数量共同增加这一事实。最后，w_S 会对可靠性模式之间的频繁切换施加惩罚，从而抑制振荡行为。

通过调整加权系数，我们可以控制性能与效率之间的权衡：较大的 w_L会促使系统采取更保守、偏重可靠性的行为，而较大的 $\{w_C, w_P, w_E\}$ 则倾向于采用效率感知策略，在条件受限时选择尽力而为传输。

给定定义的状态空间、动作空间和成本函数，QoS 自适应问题旨在针对每个自适应主题 τ，并在每个决策时刻 k，选择使所产生成本最小的 DDS 可靠性模式。最优决策可通过短视优化获得。具体而言，主题 τ 在时段 k 的最优可靠性模式为：

$$R^{\star}_{k,\tau} = \arg \min_{R_{k,\tau} \in \{\texttt{RELIABLE},\ \texttt{BEST_EFFORT}\}} J(\mathbf{s}_{k,\tau}, R_{k,\tau}). \tag{8}$$

采用短视型表述是恰当的，因为可靠性决策主要影响瞬时开销和丢失恢复成本，而跨决策时刻的长期耦合有限，并通过切换惩罚予以体现。

D. 短视解

由于动作空间是二元的，因此可通过直接比较两个候选动作，得到每个主题优化问题的闭式短视解。令 $J^{\texttt{BE}}_{k,\tau} = J(\mathbf{s}_{k,\tau}, \text{尽力而为})$ 和 $J^{\texttt{REL}}_{k,\tau} = J(\mathbf{s}_{k,\tau}, \text{可靠})$。最优决策为：

$$R^{\star}_{k,\tau} = \begin{cases} \texttt{RELIABLE}, & \text{if } J^{\texttt{REL}}_{k,\tau} < J^{\texttt{BE}}_{k,\tau}, \\ \texttt{BEST_EFFORT}, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{9}$$

等价地，定义成本差

$$\Delta_{k,\tau} = J^{\texttt{REL}}_{k,\tau} - J^{\texttt{BE}}_{k,\tau}, \tag{10}$$

当可靠性引致开销小于尽力而为模式下产生的损失惩罚时，控制器便会选择可靠模式，即当 $\Delta_{k,\tau} < 0$。

代入成本函数后，两个操作之间的差异可明确写为

$$\begin{aligned} \Delta_{k,\tau} = {} & J^{\texttt{REL}}_{k,\tau} - J^{\texttt{BE}}_{k,\tau} \\ = {} & \underbrace{w_C\, \tilde{C}_k + w_P\, \tilde{P}_{k,\tau} + w_E\,(1 - \tilde{E}_k)}_{\text{baseline reliability overhead}} \\ & + \underbrace{w_{CL}\, \tilde{C}_k \tilde{L}_k + w_{PL}\, \tilde{P}_{k,\tau} \tilde{L}_k}_{\text{loss-amplified overhead}} \\ & - \underbrace{w_L\, \tilde{L}_k}_{\text{loss penalty under best effort}} \\ & + \underbrace{w_S\Big(\mathbb{I}[R_{k-1,\tau} \neq \texttt{RELIABLE}]\Big)}_{\text{switching bias}} \\ & - \underbrace{w_S\Big(\mathbb{I}[R_{k-1,\tau} \neq \texttt{BEST_EFFORT}]\Big)}_{\text{switching bias}}. \end{aligned} \tag{11}$$

算法1总结了所提出的短视可靠性自适应过程。每个决策时段的计算复杂度为 $\mathcal{O}(|\mathcal{T}_A|)$，其中 $|\mathcal{T}_A|$ 表示自适应主题的数量。每个主题所需的内存为 $\mathcal{O}(1)$。

V. 实验结果

本节通过仿真评估所提出的框架。我们首先介绍实验设置，然后展示仿真结果并讨论研究发现。

A. 仿真环境

我们使用 Mininet（一种网络仿真器）开展实验，采用通过 Ryu 控制器实现的 SDN控制平面，并使用 Cyclone DDS 作为中间件。我们考虑具有背景流量生成的小规模无人机通信拓扑。通过受控的链路损伤和带宽约束改变网络条件，同时通过基于软件的能量模型捕获设备级约束。该设置能够在具有代表性的无线物联网设备通信动态下评估该框架。

© 2026年。仅供个人使用。已发表版本的数字对象唯一标识符：doi: 10.1109/WiMob70978.2026.11777854。

算法1DDS贪心可靠性自适应

输入： 权重 $\{w_L, w_C, w_P, w_E, w_{CL}, w_{PL}, w_S\}$
输出： 可靠性模式 $R^{\star}_{k,\tau}$ 适用于自适应主题
对于每个决策时刻 k **执行**
观测归一化状态 $\{L_k, C_k, E_k, P_{k,\tau}\}$
对所有自适应主题 τ **执行**
计算$\Delta_{k,\tau}$，使用 (11)
如果 $\Delta_{k,\tau} < 0$，**则**
$R^{\star}_{k,\tau} \leftarrow$ RELIABLE
else
$R^{\star}_{k,\tau} \leftarrow$ 尽力而为
结束条件判断
—尽力而为
通过 DDS QoS 代理强制执行$R^{\star}_{k,\tau}$
结束循环
结束循环

B. 结果与讨论

我们开展了一组仿真，以评估所提出方案的有效性。我们聚焦于具有代表性的场景，以分别隔离并验证各个适配组件。这使我们能够在受控的网络损伤条件下评估该框架的行为，并将其性能与静态配置进行比较。下文中，我们逐步激活该框架的决策组件。对于每组参数设置（例如丢包或拥塞级别），实验均重复进行 20 次独立运行，每次持续 100 秒（包括预热和冷却），以确保稳态条件。在依据 Tukey四分位距（IQR）准则排除极端瞬态偏差后，对结果进行汇总。

1) 有损链路下的消息传递：

我们在不断增加的链路丢失率（0–30%）下测量消息传递率（即已接收消息数与已传输消息数之比），并比较三种配置：静态尽力而为（BE）、静态可靠（REL）以及针对 $w_L \in \{0.2, 0.5, 0.8\}$ 的自适应可靠性，同时设置 $w_C = 0$ 和 $w_E = 0$。结果如图 3 所示。

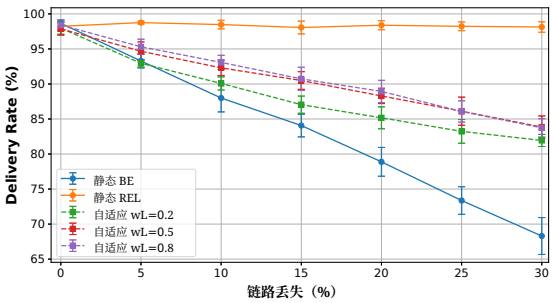

图 3. 消息传递率与链路丢失率的关系

静态尽力而为由于不进行重传，随着链路丢失增加，交付率逐渐下降；而静态可靠则以额外开销为代价，在所有丢包水平下保持较高的交付性能。自适应配置根据观测到的状态，在尽力而为和可靠模式之间动态切换。权重参数 w_L 控制对可靠性的侧重：较低的值倾向于尽力而为，而较高的值倾向于可靠传输。在低丢包条件下，该框架主要选择尽力而为，以保持效率。随着丢包增加，它逐步转向可靠模式，从而提升交付性能。增大w_L 会使自适应行为更接近静态可靠运行，从而实现可调节的可靠性与效率之间的权衡。

基于这些结果，我们得出结论：所提出的自适应框架能够对不同的丢包条件作出一致响应，同时保持性能。

2) 拥塞情况下的通信开销：

我们评估网络拥塞程度不断增加（0–80%）时的通信开销。通过背景流量消耗瓶颈容量的可控份额来模拟拥塞。开销定义为传输的总字节数除以成功送达的消息数。我们比较了 $w_C \in \{0.2, 0.5, 0.8\}$ 下的静态尽力而为、静态可靠和自适应配置，同时保持 $w_L = 0.5$和 $w_E = 0$ 不变。结果如图4所示。

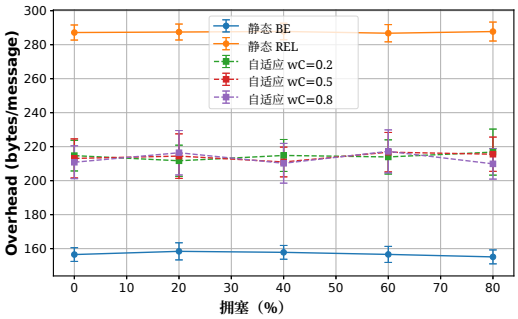

图4. 通信开销与拥塞的关系

静态可靠模式在所有拥塞程度下都持续产生较高的开销，这是由于确认流量和重传所致；而静态尽力而为模式因避免重传而保持最低开销。自适应配置会根据拥塞指标调整可靠性模式。在拥塞较低时，它的表现类似于静态可靠模式，以保持传输鲁棒性。随着拥塞加剧，它会逐渐倾向于尽力而为模式，从而降低重传开销，并限制饱和链路上的额外负载。增大 w_C 会增强这种拥塞感知能力，使自适应行为更接近静态尽力而为模式，并实现可调节的可靠性与效率之间的权衡。

这些发现验证了该框架的拥塞感知组件，并表明其能够在受限条件下降低网络负载。

3) 电池约束下的能效：

最后，我们评估该框架的能量感知组件。在本实验中，我们引入一个与传输

© 2026年。仅供个人使用。已发表版本，数字对象唯一标识符： 10.1109/WiMob70978.2026.11777854。

活动成比例递减的电池状态变量。对于 $w_E \in \{0.2, 0.5, 0.8\}$，我们比较静态尽力而为、静态可靠和自适应配置，同时保持 $w_L = 0.5$ 和 $w_C = 0.5$ 不变。能耗根据每次运行期间的归一化电池消耗计算。结果如图 5 所示。

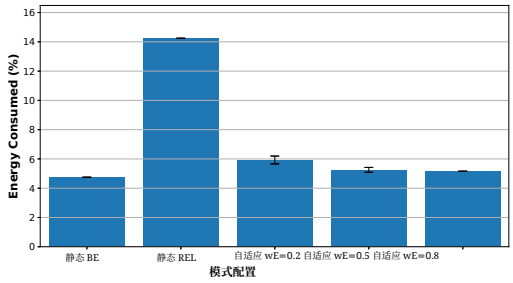

图 5. 能耗比较

静态可靠模式的能耗最高，这是由于确认流量和重传所致；而静态尽力而为模式通过避免重传开销，将能耗降至最低。自适应配置通过权重 w_E，根据电池状态调整可靠性模式。当能量水平较高时，系统倾向于采用可靠传输以保持鲁棒性。随着电池电量耗尽，该框架逐步转向尽力而为模式，以降低传输成本并延长运行寿命。增大 w_E 会增强能量感知，使自适应行为更趋近于静态尽力而为模式，并降低总体能耗。

结果表明，该框架有效融入了能量感知，在可靠性与资源效率之间提供了可控的权衡，从而在电池受限条件下延长运行时间。

在所有场景中，该框架在不同约束条件下均表现出一致且可控的行为：它提高有损链路上的可靠传输，在拥塞时转向尽力而为以减少开销，并在电池受限时优先采用节能运行方式，以延长系统寿命。这些结果表明，该框架有效地将可靠性、拥塞感知和能量感知整合到统一的上下文感知 DDS 自适应机制中。

六、结论

在本研究中，我们提出了一种跨层DDS可靠性自适应框架，通过综合考虑全局网络状况、设备级能量约束和主题流行度，动态调整通信可靠性。仿真结果证明，该框架能够有效提升IoD场景中的通信可靠性和效率。

作为未来的工作，我们计划扩展该框架，以纳入其他 DDS QoS策略（例如截止期限和历史深度），研究能够预测网络退化和移动性引发的中断的主动式自适应策略，并探索基于学习的方法，以实现决策参数的自适应调优。我们还计划验证该框架，通过广泛的开销和敏感性分析，以及在 Heudiasyc 无人机测试平台上的实验部署。

参考文献

[1] P. Boccadoro, D. Striccoli, and L. A. Grieco, “无人机互联网研究综述,” 自组织网络, vol. 122, p. 102600, 2021. [2] L. Abualigah, A. Diabat, P. Sumari, and A. H. Gandomi, “无人机互联网（IoD）的应用、部署与集成：综述,” IEEE传感器期刊, vol. 21, no. 22, pp. 25 532–25 546, 2021. [3] L. M. S. Bine, A. Boukerche, L. B. Ruiz, and A. A. F. Loureiro, “连接无人机互联网与城市计算：方法、协议与应用,” 计算机网络, vol. 239, p. 110136, 2024. [4] S. Javed, A. Hassan, R. Ahmad, W. Ahmed, R. Ahmed, A. Saadat, and M. Guizani, “无人机集群的最新进展与未来研究挑战,” IEEE物联网期刊, vol. 11, no. 11, pp. 19 023– 19 045, 2024. [5] H. Lee, D. Kim, and S. Moon, “通过预加载和网络感知优化无人机集群的数据分发服务发现,” Drones, vol. 9, no. 8, 2025. [6] M. L. Gambo, A. Danasabe, B. Almadani, F. Aliyu, A. Aliyu, and E. Al-Nahari, “机器人系统中DDS中间件的系统性文献综述,” Robotics, vol. 14, no. 5, 2025. [7] I. Vidal, P. Bellavista, V. Sanchez-Aguero, J. Garcia-Reinoso, F. Valera, B. Nogales, and A. Azcorra, “利用以数据为中心的通信实现多任务互操作UAS,” 传感器, vol. 18, 10, 2018 no. .[8] J. F. Ingl´es-Romero, A. Romero-Garc´es, C. Vicente-Chicote, and J. Mart´ınez, “一种在基于DDS的中间件中实现自适应服务质量的方法：模型驱动方法,” IEEE Trans. Emerging Topics Comput. Intell., vol. 1, no. 3, pp. 176–187, 2017. [9] G. Yoon, S. Lee, and H. Choi, “服务质量优化器,” in Proc. Int. Conf. Platform Technology and Service (PlatCon), 2016, pp. 1–5. [10] M. A. Zormati, H. Lakhlef, and S. Ouni, “物联网智能网络软化最新进展综述与分析,” 计算机网络, vol. 241, p. 110215, 2024. [11] H.-Y. Choi, A. L. King, and I. Lee, “利用OpenFlow实现DDS真正的实时性,” in Proc. Int. Conf. Embedded Software (EMSOFT), 2016, pp. 1–10. [12] B. Li, Y. Zhu, X. Yao, C. Jiang, K. Lu, and Z. Sun, “利用IEEE 802.1Qbv时间敏感网络实现DDS确定性传输,” 计算机网络, vol. 261, p. 111128, 2025. [13] L. Bertaux, A. Hakiri, S. Medjiah, P. Berthou, and S. Abdellatif, “一种基于DDS/SDN的通信系统，可高效支持动态分布式实时应用,” in Proc. IEEE/ACM Int. Symp. Distributed Simulation and Real-Time Applications, 2014, pp. 77–84.[14] 对象管理组织, “数据分发服务（DDS）1.4版,” OMG, Tech. Rep. formal/2015-04-10, 2015. [15] J. Zhang, X. Yu, S. Ha, J. Pe˜na Queralta, and T. Westerlund, “分布式ROS 2系统中边缘到边缘与边缘到云通信的中间件比较,” 智能与机器人系统期刊, vol. 110, no. 4, p. 162, 2024. [16] A. Alaerjan, “形式化DDS QoS策略语义以改善分布式智能电网应用中的通信,” Electronics, vol. 12, no. 10, 2023. [17] A. Al-Roubaiey, T. Sheltami, A. Mahmoud, and A. Yasar, “EATDDS：面向无线传感器与执行器网络的能量感知中间件,” 未来一代计算机系统, vol. 96, pp. 196–206, 2019. [18] P. Salehi, K. Zhang, and H.-A. Jacobsen, “PopSub：提升分布式基于内容的发布/订阅系统中的资源利用率,” in Proc. ACM Int. Conf. Distributed Event-Based Systems (DEBS), 2017, pp. 88–99. [19] R. Singh, K. D. Ballal, M. S. Berger, and L. Dittmann, “5G中的无人机通信需求概述,” in Proc. IoT Week, 2022, pp. 3–16. [20] P. Chaudhary and N. Hubballi, “ PeNCache：命名数据网络中的基于流行度的协作缓存,” 计算机网络, vol. 257, p. 110995, 2025. [21] X. Huang, Z. Chen, Q. Chen, and J. Zhang, “基于联邦学习的雾计算支持的物联网网络服务质量感知缓存决策,” 数字通信与网络, vol. 9, no. 2, pp. 580–589, 2023.

© 2026年。仅供个人使用。已发表版本，数字对象唯一标识符: 10.1109/WiMob70978.2026.11777854。