一体化通信与控制系统：数据重要性视角

Stefan Roth*、Yasemin Karacora*、Christina Chaccour‡、Aydin Sezgin* 和 Walid Saad‡
*德国波鸿波鸿鲁尔大学
‡美国弗吉尼亚州阿灵顿，弗吉尼亚理工大学布拉德利电气与计算机工程系 邮箱：{
stefan.roth-k21,yasemin.karacora,aydin.sezgin}@rub.de, {christinac,walids}@vt.edu

arXiv:2302.01998v1 [cs.IT] 3 Feb 2023

摘要——互联智能设备和工业物联网设备需要在资源有限的情况下实现低时延通信，以满足控制目标。从本质上说，这类设备具有时间关键性，同时还需要依据数据重要性提供高度准确的数据输入。本文从数据重要性视角研究了多种协同式和分布式语义调度方案。具体而言，我们提出了新颖的算法，以估计精度为指标分析此类方案在数据重要性方面的收益。随后，我们推导出可实现估计精度的界。数值结果表明，采用一体化控制与通信策略的语义调度策略更具优势。从本质上说，与传统策略相比，这类策略能够降低均方误差加权和。

索引词—数据重要性、调度、ALOHA、控制、均方误差、过程监测

一、引言

工业物联网（IIoT）设备是第五代（5G）及后续无线网络的基本组成部分。物联网设备的目标是监测、跟踪或控制系统。因此，传感器记录物理过程的测量值，而接收设备必须实时处理这些测量值。例如，在控制系统中，执行器需要对测量数据的变化立即做出反应。因此，这类操作必须以时间关键的方式执行，同时确保信息准确且无错误 [1]。不同过程系统的动态特性可能各不相同。因此，并非所有数据都应一视同仁，因为传感器 A 传输的数据可能与传感器 B发送的数据具有不同的语义（含义）。因此，这些语义可能决定整个系统的状态。因此，在优化整体控制与通信系统时，必须考虑重要性级别 [1], [2] 和关键性要求[3] 。这意味着，在此类应用中，仅考虑时延和信息新鲜度不足以满足设备的服务质量（QoS）要求。因此，通信方案应通过考虑过程的动态特性 [1]–[5]来提高信息准确性 [4] 。然而，无线介质的通信资源有限，因此人们提出了各种资源管理和分配方案，以便在时间、空间和频率维度上协调并复用这些资源。在此，可以采用调度方案，为有需求的物联网设备分配不同的资源块。具体而言， [6] 和 [7]中介绍的协调调度方案，会在不同发射机之间采用统一协调机制。需要注意的是，在工业物联网中，实际部署中央协调器可能会带来复杂问题。另一种选择是采用非协调或随机接入机制，例如 ALOHA（如 [8]–[11]），这类机制不需要集中协调。在此类方案中，发射机的决策机制在本地以分布式方式执行。值得注意的是，在 ALOHA 方案中，同时接入可能导致分组碰撞，进而比协调调度方案产生更多解码错误。

迄今为止，在 5G 系统中，时间关键型通信一直是在所谓的超可靠低时延通信（URLLC）范式下进行研究的。对于这类服务，端到端时延和可靠性至关重要，必须在极为严格的要求下加以控制。然而，近期研究（如 [12] ）考察了除时延之外刻画信息新鲜度的必要性。从本质上说，可以通过信息年龄（AoI）来衡量不同工业物联网设备处接收数据的信息新鲜度。事实上，这一指标常用于研究不同协调式和非协调式调度方案的行为 [7], [13]。为体现数据重要性的不同等级， [14] 的作者建议采用语义调度，在图结构网络上进行通信。然而， [14] 并未考虑工业物联网应用中不同过程系统各自存在的系统动态。因此， [7] 提出对各发射器采用不同的调度方式，以提高接收器处以平均均方误差（MSE）衡量的估计精度。然而，关于如何为工业物联网设计语义调度策略，目前仅有有限的讨论。显然，有必要从控制与通信一体化的视角研究此类方案，才能充分满足应用在数据准确性、及时性和新鲜度方面的服务质量要求。

S. Roth 和 A. Sezgin 的研究获得德国北莱茵-威斯特法伦州经济事务、工业、气候行动与能源部资助，项目编号为 005-2108-0021（5G-Expo）。Y. Karacora 的研究获得德国北莱茵-威斯特法伦州经济事务、工业、气候行动与能源部资助，项目编号为 005-2108-0028（5G-Furios）。C. Chaccour 和 W. Saad 的研究获得美国海军研究办公室（ONR）多学科大学研究计划（MURI）资助，项目编号为 N00014- 19-1-2621。

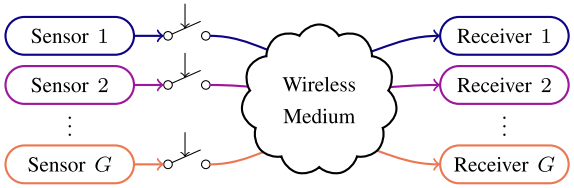


图 1：多个传感器通过无线介质传输数据。为避免碰撞，采用调度方案。

贡献：本文研究了不同的语义调度策略，并将数据重要性的不同等级纳入控制性能的考量。因此，我们提出了两种算法，用于分析协调式调度方案和随机接入（ALOHA）调度方案的均方误差。随后，我们推导了均方误差的界。最后，我们通过数值分析均方误差，展示了将控制纳入调度方案的必要性，同时借助语义方案兼顾通信的及时性和新鲜度。因此，我们比较了不同策略下得到的区域，并表明语义策略具有优势。

符号说明：符号约定如下：向量、矩阵和集合分别用粗体小写字母、粗体大写字母和花体字母 $\boldsymbol{a}$、$\boldsymbol{A}$ 和 $\mathcal{A}$ 表示。上标 $\boldsymbol{A}^H$ 表示 $\boldsymbol{A}$ 的厄米特矩阵。$\|\boldsymbol{a}\|$ 表示向量 $\boldsymbol{a}$ 的 L_2- 范数；$\mathrm{E}_a[A(a)]$ 表示 A 关于随机变量 a 的期望。$\boldsymbol{A}\circ\boldsymbol{B}$ 表示哈达玛积。

II. 系统模型与问题表述

我们考虑一个物联网环境，其中 G 个传感器监测过程系统，并定期向接收器传输测量值（见图 1）。由于过程系统的测量值通常随时间缓慢变化，因此在控制理论中通常将其建模为线性微分矩阵方程 [15]。这意味着，第 g 个传感器的测量值 $\boldsymbol{x}_g(t)$ 可描述为

$$\frac{\partial \boldsymbol{x}_g(t)}{\partial t} = \boldsymbol{A}_g \boldsymbol{x}_g(t) + \boldsymbol{d}_g(t), \tag{1}$$

$$\boldsymbol{x}_g(0) = \boldsymbol{x}_{g,0}. \tag{2}$$

因此，$\boldsymbol{A}_g$ 是传感器 g 的状态转移矩阵，而 $\boldsymbol{d}_g(t)$是时间 t 对应的高斯分布输入噪声，即 $\boldsymbol{d}_g(t) \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{0}, \boldsymbol{D}_g)$；而$\boldsymbol{x}_{g,0}$是时间 $t=0$的测量值。因此，时间 t 的系统状态值遵循高斯-马尔可夫模型，可表示为

$$\boldsymbol{x}_g(t) = e^{\boldsymbol{A}_g t}\boldsymbol{x}_{g,0} + \int_0^t e^{\boldsymbol{A}_g(t-t')}\boldsymbol{d}_g(t')dt'. \tag{3}$$

每个传感器 g 都会定期测量相应的过程值，测量时间戳为 $t_{g,i}\forall i$ 并按照信道接入策略 $S_g = (t_{g,1}, t_{g,2}, \ldots\ldots)$ 随后立即传输测量值。信道接入策略会考虑不同的重要性级别，稍后我们将对此进行详细说明。在协调调度中，不同的信道接入策略 G 彼此相关（由于集中协调）；而在 ALOHA 等随机接入方案中，它们彼此不相关。每次传输都需要一段时间 Δ 才能完成。当两个传感器安排的数据包传输时间部分重叠时，数据包会发生碰撞。在这种情况下，没有任何数据包能够成功解码。否则，信道噪声会导致解码失败，其概率为 ε。当索引为 i 的数据包成功解码后，其中的数据将用于估计系统状态值 $\boldsymbol{x}_g(t)$，直至后续数据包成功解码。根据式 (3)，该估计值可表示为

$$\hat{\boldsymbol{x}}_g(t) = e^{\boldsymbol{A}_g(t-t_{g,i})}\boldsymbol{x}_g(t_{g,i}). \tag{4}$$

每个数据包在接收器端用于估计的时间跨度可用信息年龄区间$[\underline{\tau}, \overline{\tau})$描述。因此，信息年龄界为 $\underline{\tau} = \Delta$ 和 $\overline{\tau}$，可能因数据包而异，并取决于信道接入策略。

接收器端信息的准确性可用第 g个接收器的估计值与对应系统状态之间的均方误差来描述，即

$$\mathsf{MSE}_g = \mathbb{E}_t\left[\|\hat{\boldsymbol{x}}_g(t) - \boldsymbol{x}_g(t)\|^2\right]. \tag{5}$$

请注意，过程系统的测量值具有遍历性。由 [16], (5)可表示为平均数据包积分均方误差与某一数据包用于数据包估计的平均时间跨度之比，即

$$\mathsf{MSE}_g = \frac{\mathbb{E}_{\underline{\tau},\overline{\tau}}\left[L_g\left(\underline{\tau},\overline{\tau}\right)\right]}{\mathbb{E}_{\underline{\tau},\overline{\tau}}\left[\overline{\tau}-\underline{\tau}\right]}. \tag{6}$$

这里，$L_g(\underline{\tau},\overline{\tau})$ 是数据包积分均方误差，即瞬时均方误差在信息年龄区间 $[\underline{\tau},\overline{\tau})$ 上的积分。该值由下文的引理1给出，可直接由 [7] 得出。

引理1。数据包积分均方误差等于

$$L_g\left(\underline{\tau},\overline{\tau}\right) = \mathrm{trace}\Big\{e^{\boldsymbol{A}_g\overline{\tau}}\boldsymbol{\Phi}_g e^{\boldsymbol{A}_g^H\overline{\tau}} - e^{\boldsymbol{A}_g\underline{\tau}}\boldsymbol{\Phi}_g e^{\boldsymbol{A}_g^H\underline{\tau}} - \boldsymbol{\Upsilon}_g\left(\overline{\tau}-\underline{\tau}\right)\Big\}, \tag{7}$$

其中

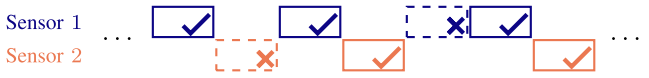
$$\boldsymbol{\Upsilon}_g = \boldsymbol{U}_g\left(\left(\boldsymbol{U}_g^{-1}\boldsymbol{D}_g\boldsymbol{U}_g^{-H}\right)\circ\boldsymbol{B}\right)\boldsymbol{U}_g^H, \tag{8}$$

$$\boldsymbol{\Phi}_g = \boldsymbol{U}_g\left(\left(\boldsymbol{U}_g^{-1}\boldsymbol{\Upsilon}_g\boldsymbol{U}_g^{-H}\right)\circ\boldsymbol{B}\right)\boldsymbol{U}_g^H. \tag{9}$$

此外，$\boldsymbol{A}_g = \boldsymbol{U}_g\boldsymbol{\Lambda}_g\boldsymbol{U}_g^{-1}$是$\boldsymbol{A}_g$的特征值分解，且$(\boldsymbol{B})_{m,n} = \left((\boldsymbol{\Lambda}_g)_{m,m} + (\boldsymbol{\Lambda}_g)^*_{n,n}\right)^{-1}$。

注1。在式(7)中，第一项的指数，即 $\boldsymbol{A}_g\overline{\tau}$，描述了状态转移矩阵 $\boldsymbol{A}_g$ 与峰值信息年龄 $\overline{\tau}$的乘积。这表明，当信息年龄较小，或相应的 $\boldsymbol{A}_g$ 具有较小的特征值时，索引为 g 的估计均方误差较低。由于 G 状态转移矩阵的特征值幅度可能大不相同，因此频繁传输对所有传感器的重要性并不相同。换言之，不同传感器传输的数据具有不同的重要性级别。

现在回顾一下，不同传感器 $g \in \{1,\ldots,G\}$ 的信道接入策略 S_g 可以彼此相关（在协调调度设置中），也可以彼此不相关（在



(a) 最大尝试次数-(∞, 1)



(b) 多次成功-(2, 1)

图 2：两个传感器采用不同协调调度策略的示意图。两个传感器的传输分别以蓝色和橙色表示；勾号和叉号分别表示解码成功和失败。



(a) 个体 CAP



(b) 阈值 ADRA

图 3：两个传感器采用不同 ALOHA 策略的示意图。两个传感器的传输分别以蓝色和橙色表示；勾号和叉号分别表示解码成功和失败。

ALOHA 设置中）。对于这两种情况，我们的目标都是从一组预定义的信道接入策略 $\mathcal{S}$中进行选择，使加权均方误差最小化，即：

$$\underset{S_g \in \mathcal{S}, g=1,\ldots,G}{\text{minimize}} \sum_{g=1}^{G} \alpha_g \text{MSE}_g. \tag{10}$$

在 (10) 中，α_g、$g = 1$、……、G 是表示不同关键性级别的权重因子，其定义满足 $\sum_{g=1}^{G} \alpha_g = 1$。接下来，我们将讨论不同的信道接入策略，并提供算法来评估一组固定的信道接入策略。随后，选出使均方误差最小的信道接入策略。

III. 语义调度的信道接入策略

各种信道接入策略可用于协调调度和随机接入调度。本节将重点介绍语义调度策略如何实现一种综合控制与通信策略，以处理数据重要性。

A. 协调调度设置中的信道接入策略

对于协调调度的情况，我们考虑以下信道接入策略（另见图 2）：

- 在 [7], 中提出了一种语义调度策略，我们将其称为 max-trials-($P_1, P_2, \ldots$)。因此，各传感器轮流传输数据包。每个传感器 g 最多可以尝试 P_g 次，但一旦传输成功便停止。随后，下一个传感器开始传输。在特殊情况下，max-trials-(1, 1, . . .) 和 max-trials- $(\infty, \infty, \ldots)$ 这一策略分别等同于广泛使用的轮询和最大年龄调度策略。
- 我们还提出一种新颖的语义方案，称为多重成功（Q_1、Q_2、……）。为此，将考虑的总时间划分为若干时间间隔。在每个时间间隔内，对所有传感器进行调度，使得每个传感器g 在 Q_g 个传输块内传输。在每个传输块中，传感器持续发送数据包，直到有一个数据包成功接收。$Q_1 + \cdots + Q_G$个传输块的排序方式使得每个传感器的传输块尽可能彼此分开。因此，即使不存在解码错误，不同的重要性级别仍然与之相关。

B. ALOHA 设置中的信道接入策略

在 ALOHA 方案中，每个传感器都采用自己的信道接入策略，其传输时刻服从随机分布。纯 ALOHA 方案不要求传感器之间进行任何协调，而时隙 ALOHA 方案则允许协商特定的时隙用于传输。在我们的分析中，我们重点研究时隙 ALOHA。考虑以下方案（见图 3）：

- 每个传感器 g 都可以具有个体信道接入概率（CAP） R_g [8]。对于所有时隙，每个传感器的 CAP 都保持不变。不过，我们考虑不同传感器的 CAP 可以各不相同，从而纳入不同的重要性级别。我们将此方案称为个体 CAP-($R_1, R_2, \ldots$)。
- 此外，我们还分析了基于阈值的分布式年龄依赖随机接入（ADRA） [8] 方案。在该方案中，每个传感器在成功接收后暂停传输，直到达到特定的信息年龄（AoI） $\tilde{\tau}_g$。此后，每个时隙都以 CAP R_g 发送数据包，直至成功接收。同样，我们假设可以为每个传感器分别选择个体 $\tilde{\tau}_g$ 和 R_g，以纳入不同的重要性级别。我们将此方案称为阈值 ADRA-($R_1, R_2, \ldots$)-($\tilde{\tau}_1, \tilde{\tau}_2, \ldots$)。

IV. 均方误差分析

对于每一组考虑的信道接入策略$S_1, .., S_g$，均可计算时间平均均方误差。此处，我们需要区分协调调度策略与分布式信道接入策略（例如 ALOHA 设置）的情况。

A. 协调调度设置中的均方误差

我们的目标是开发一种算法，模拟大量 K 数据包传输，以获得协调调度设置下的时间平均均方误差。为此，我们通过对所有数据包传输的均方误差进行积分，并将结果除以所考虑的总时间跨度，从而在数值上确定预期均方误差。回想一下，传输时刻以集中式方式选择，因此碰撞错误

算法1 集中式调度下的平均均方误差

输入：模拟的数据包数量 K，信道接入策略 $S_1, \ldots, S_g$
初始化 $\underline{\tau}_g \leftarrow 0, t_g \leftarrow 0, \underline{t}_g \leftarrow 0, \ell_g \leftarrow 0$ 对所有 g
对于 $k \leftarrow 1$ 到 K 执行
  $(t_g, g) \leftarrow$ 由 S_1 调度的时间和源，$\ldots, S_G$
  $\Delta \leftarrow$ （可能是随机的）传输时间
  如果 rand() $< 1-\varepsilon$ 则
    $\ell_g \leftarrow \ell_g + L_g(\underline{\tau}_g, t_g + \Delta - \underline{t}_g)$ {积分均方误差}
    $\underline{t}_g \leftarrow t_g$ {存储传输时间}
    $\underline{\tau}_g \leftarrow \Delta$ {存储传输时延}
  结束条件判断
结束循环
$t_{g'} \leftarrow t_g$ 对于所有 g'
$\ell_{g'} \leftarrow \ell_{g'} + L_{g'}(\underline{\tau}_g, t_{g'} - \underline{t}_{g'})$ 对于所有 g' {积分均方误差}
输出：所有 g' 的均方误差$_{g'} \leftarrow \ell_{g'}/t_{g'}$ {均方误差输出}

得以避免。因此，解码错误只能由接收机噪声引起，所以对于所有数据包，错误概率均为 ε 且保持不变。一旦模拟得出某次数据传输成功，我们便可计算数据包积分均方误差，并更新接收器处数据的传输时刻和传输时延。最后，对所有接收器的均方误差值进行更新，从而考虑相等的时间间隔。完整算法如算法1所示，其中 rand() 生成服从区间 $[0,1$ 上连续均匀分布的变量。

使用此算法，可以评估涉及协调接入方案的策略。若要评估采用非协调接入的策略，则需要修改该算法。

B. ALOHA 设置中的均方误差

本文提出了一种分析 ALOHA 设置中均方误差的算法。我们同样通过对大量传输数据包进行仿真来评估均方误差 K。与上述情况不同，传感器独立调度各自的数据包。因此，除接收机噪声外，传输碰撞也可能导致解码错误。因此，需要同时对所有信道接入策略建模，以确定哪个传感器首先传输，以及哪些数据包发生碰撞。因此，在整个算法运行过程中，我们都会存储每个传感器的下一次传输时间。在每次循环迭代中，我们模拟由任一传感器调度的最早数据包的传输。若以下三个条件均成立，则认为数据包解码成功：

- 首先，在该数据包的传输区间内，不能有其他传感器被安排开始传输。该定义在数学上等价于条件 $\nexists g' \neq g: t_{g'} < t_g + \Delta$。
- 其次，不能有其他传感器计划在短时间内开始传输，以免传输发生重叠。此条件等同于上一次迭代中的第一个条件。在所提出的算法中，我们使用一个额外的变量 f 来评估上一次迭代中的这一条件。

算法 2 分布式 ALOHA 中的平均均方误差和信息年龄

输入：模拟的数据包数量 K，信道接入策略 $S_1, \ldots, S_g$
初始化 $\underline{\tau}_g \leftarrow 0, t_g \leftarrow 0, \underline{t}_g \leftarrow 0, \ell_g \leftarrow 0$ 对所有 g, $f \leftarrow 1$

$t_g \leftarrow$ 由 S_g 为所有 g安排的时间
对 $k \leftarrow 1$ 至 K 执行
  $g \leftarrow \arg\min_g(t_1, \ldots, t_G)$ {下一个数据包的源}
  $\Delta \leftarrow$ （可能为随机的）传输时间
  如果 $\nexists g' \neq g: t_{g'} < t_g + \Delta$ 且 f 且 rand() $< 1-\varepsilon$，则
    $\ell_g \leftarrow \ell_g + L_g(\underline{\tau}_g, t_g + \Delta - \underline{t}_g)$ {积分均方误差}
    $\underline{t}_g \leftarrow t_g$ {存储传输时间}
    $\underline{\tau}_g \leftarrow \Delta$ {存储传输时延}
  结束 if
  $f \leftarrow \nexists g' \neq g: t_{g'} < t_g + \Delta$
  $t_g \leftarrow$ 由 S 调度的时间 g
结束循环
$t_{g'} \leftarrow t_g$ 对于所有 g'
$\ell_{g'} \leftarrow \ell_{g'} + L_{g'}(\underline{\tau}_g, t_{g'} - \underline{t}_{g'})$ 对于所有 g' {积分均方误差}
输出：均方误差$_{g'} \leftarrow \ell_{g'}/t_{g'}$ 对于所有 g' {输出均方误差}

- 第三，接收机噪声也不能导致解码错误。若 rand() $< 1-\varepsilon$，则满足此条件，其中 rand() 指在 $[0,1$ 上均匀分布的变量。

如果数据包满足所有条件，则将数据包积分均方误差累加到积分均方误差中。此外，还会更新接收数据的传输时间和传输时延。在迭代结束时，变量f 会更新，以便识别碰撞。此外，已调度的传感器会根据相应的信道接入策略确定其下一个传输时刻。完整算法见算法2。

V. 均方误差的上界与下界

本节研究接收器 g处估计值的均方误差界。这些参考值有助于评估所考虑策略的质量。当传感器 g 依次安排传输且不等待、其他传感器保持静默（因此不会发生碰撞）时，均方误差达到下界。根据两次成功传输之间未成功传输次数N 的分布以及传输时刻 Δ_n，可由式（6）得到均方误差：

$$\mathsf{MSE}_{g,\mathrm{LB}} = \frac{\mathbb{E}_{\Delta_n \forall n,N}\left[L_g\left(\Delta_1, \sum_{n=1}^{N+2}\Delta_n\right)\right]}{\mathbb{E}_{\Delta_n \forall n,N}\left[\sum_{n=2}^{N+2}\Delta_n\right]}. \tag{11}$$

如果已知传输时间的分布，则可以通过解析或数值方法计算该值。如果 Δ_n 是时间常数，

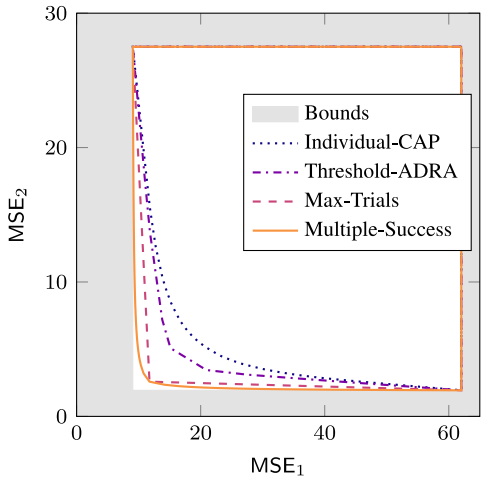


图 4：稳定系统采用不同调度策略时均方误差值的可达区域。

即 $\Delta_n = \Delta$，则此下界为

$$\mathsf{MSE}_{g,\mathrm{LB}} = \frac{\operatorname{trace}\left\{e^{\boldsymbol{A}_g 2\Delta}\boldsymbol{\Psi}_g e^{\boldsymbol{A}_g^H 2\Delta} - e^{\boldsymbol{A}_g \Delta}\boldsymbol{\Phi} e^{\boldsymbol{A}_g^H \Delta} - \frac{\Delta}{1-\varepsilon}\boldsymbol{\Upsilon}_g\right\}}{\frac{\Delta}{1-\varepsilon}}, \tag{12}$$

其中

$$\boldsymbol{\Psi}_g = \boldsymbol{U}_g\left(\left(\boldsymbol{U}_g^{-1}\boldsymbol{\Phi}_g\boldsymbol{U}_g^{-H}\right)\circ\boldsymbol{C}_g\right)\boldsymbol{U}^H, \tag{13}$$

$$\left(\boldsymbol{C}_g\right)_{m,n} = \frac{1-\varepsilon}{1-\varepsilon e^{\left(\lambda_{g,m}+\lambda_{g,n}^*\right)\Delta}}. \tag{14}$$

当所有传输数据包均发生碰撞时，可以得到一个上界。如果系统稳定（即 $\boldsymbol{A}_g$ 的所有特征值均为负），则该上界有限，并且可针对 $\overline{\tau} \to \infty$ 的情况由式 (6) 得到。而对于不稳定系统（即 $\boldsymbol{A}_g$ 存在正特征值），该上界则为无穷大。

$$M_{g,\mathrm{UB}} = \begin{cases} -\operatorname{trace}\left\{\boldsymbol{\Upsilon}\right\} & \operatorname{eig}_i\left(\boldsymbol{A}_g\right) < 0 \forall i \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases}. \tag{15}$$

下面我们将通过数值分析信道接入策略对均方误差的影响，并将其均方误差值与界进行比较。

VI. 数值结果

我们考虑包含 $G = 2$ 个传感器的物联网环境，并研究两个接收器处估计值的均方误差（MSE）。因此，我们首先关注具有稳定动态的系统，即特征值为负的系统，然后再考虑具有不稳定动态的系统，即特征值为正的系统。两种情况下，信道均由 $\Delta = 1$ 和 $\varepsilon = 0.05$ 表征。

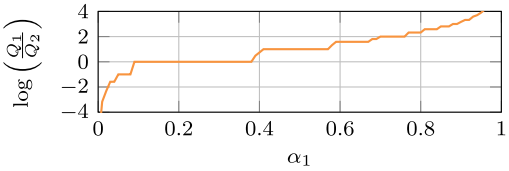


图 5：稳定系统的多重成功参数。

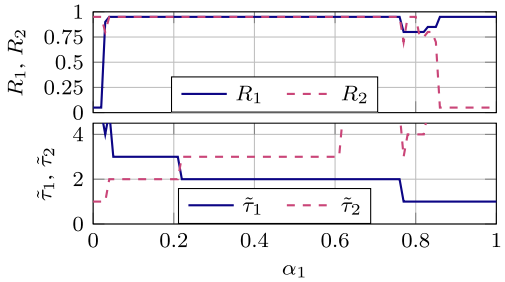


图 6：稳定系统的阈值 ADRA 参数。

A. 稳定系统的可达区域

我们首先考虑两个稳定系统[1]，，即 $\boldsymbol{A}_1$ 和 $\boldsymbol{A}_2$的特征值均为负，因此即使不传输数据，均方误差（MSE）也会保持有界。图 4 展示了采用不同调度策略所获得的 MSE 可实现区域。各策略类别对应曲线中位于底部和左侧的部分为帕累托最优。为获得所有策略对应的区域，我们假设可以对所得点进行时间共享。正如预期，结果表明，采用集中式调度的策略优于随机接入策略。请注意，传统调度策略轮询和最大年龄所能达到的 MSE 区域，与最大尝试次数策略的区域几乎相同（因此图中未显示）。不过，多重成功策略能够填充上述策略与第五节所示边界之间的相当一部分区域。图 5 表明，采用这一策略时，对于大多数权重 α_1，为两个传感器选择基于显著性的参数是最优的。图 4 还表明，阈值ADRA策略优于个体 CAP 策略。图 6 展示了阈值ADRA的最优参数选择。图中显示，这种情况下基于显著性的参数选择同样有益，尤其是基于显著性的阈值选择。

[1]我们考虑来自 [7], 的两个过程系统，其中第一个系统的参数为

$$\boldsymbol{A}_1 = \begin{pmatrix} -0.04 & 0.03 & -0.05 \\ -0.01 & -0.06 & 0.05 \\ 0.2 & 0.15 & -0.4 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{D}_1 = \begin{pmatrix} 4 & 1 & 3 \\ 1 & 0.25 & 0.75 \\ 3 & 0.75 & 2.25 \end{pmatrix}$$

第二个系统由以下内容指定

$$\boldsymbol{A}_2 = \begin{pmatrix} -0.02 & 0 \\ 0 & -0.03 \end{pmatrix}, \qquad \boldsymbol{D}_2 = \begin{pmatrix} 0.7 & 0.2 \\ 0.2 & 0.6 \end{pmatrix}.$$

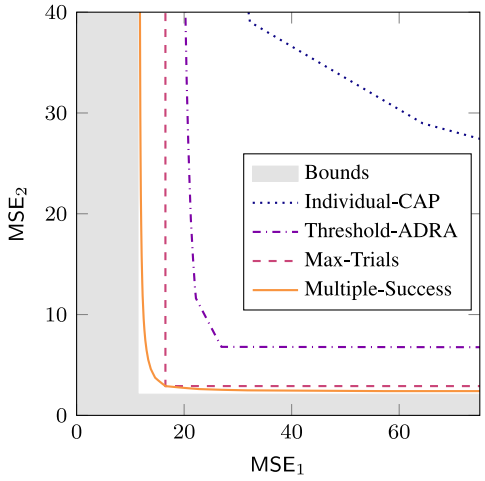


图7：采用不同调度和 ALOHA 策略时，不稳定系统的均方误差值可实现区域。

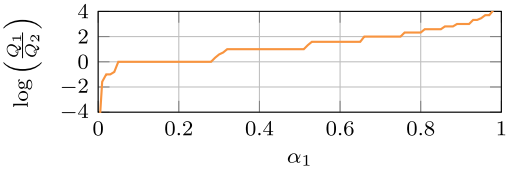


图8：不稳定系统的多重成功参数。

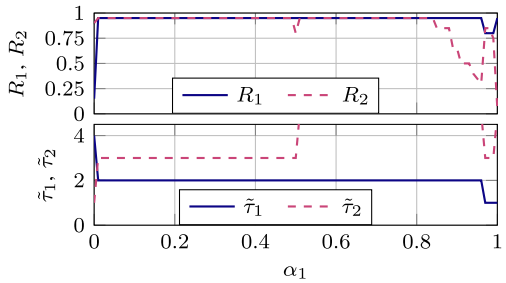


图9：不稳定系统的阈值 ADRA 参数。

B. 不稳定系统的可实现区域

为研究具有不稳定动态的系统，我们现在采用略有不同的参数[2]，，使系统矩阵具有正特征值。图7展示了在所考虑的调度策略和 ALOHA 策略下可达的均方误差值区域。与先前的结果相比，均方误差没有上界，而且各策略与下界之间的差距更大。协调调度策略在此也优于 ALOHA 方案。然而，即使对于所考虑的不稳定系统，传统策略轮询和最大年龄策略的可达区域仍与最大试验次数策略相似。与稳定系统类似，多重成功策略能够显著填补上述策略与均方误差界之间的差距。图8表明，即使在更大的 α_1范围内，基于重要性的参数选择仍有益处。图7还展示了该系统下不同 ALOHA 策略的可达区域。其中，采用个体 CAP概率所得到的区域各部分仅包含相对较高的均方误差值。相比之下，阈值年龄依赖随机接入策略显著扩大了可达区域。对于这一策略，几乎所有帕累托最优点都只能通过基于重要性的参数选择实现（见图9）。

VII. 结论

传统上，控制与通信系统是分别优化的。本文提出了两种算法，用于研究媒介接入设计（即协调调度和 ALOHA）对控制系统可用性的影响，并以均方误差为衡量指标。数值结果表明，语义调度，即赋予更高优先级由于数据重要性水平不同，向某些传感器提供的数据可能比向其他传感器提供的数据更优，这在稳定和不稳定的动态系统中均可能如此。这样一来，便可改善某个接收器处估计值的均方误差，但代价是另一个接收器处的均方误差增大。由于优先级和系统动态可能大不相同，因此可以提高数据在特定应用中的整体可用性。

[2]现在，我们对上一节中的系统参数进行修改，使得 $\boldsymbol{A}_1' = -\boldsymbol{A}_1$ 和 $\boldsymbol{A}_2' = -\boldsymbol{A}_2$。矩阵 $\boldsymbol{D}_1'$ 和 $\boldsymbol{D}_2'$ 保持不变，即 $\boldsymbol{D}_1' = \boldsymbol{D}_1$ 和 $\boldsymbol{D}_2' = \boldsymbol{D}_2$。

参考文献

[1] E. Uysal, O. Kaya, A. Ephremides, J. Gross, M. Codreanu, P. Popovski, M. Assaad, G. Liva, A. Munari, B. Soret, T. Soleymani, and K. H. Johansson, 《网络化系统中的语义通信：数据重要性视角》，IEEE Netw., 第36卷，第4期，第233–240页，2022年。[2] C. Chaccour, W. Saad, M. Debbah, Z. Han, and H. V. Poor, 《更少的数据，更多的知识：构建下一代语义通信网络》，
2022 [ ] 2211 14343 。在线。[3]
可访问：https://arxiv.org/abs/。R.-J. Reifert, S. Roth, A. A. Ahmad, and A. Sezgin, 《东山再起：混合关键型无线网络资源管理的韧性》，
2022 [ ] 2204 11878 。在线。可访问：[4]
https://arxiv.org/abs/。S. Roth, A. Arafa, H. V. Poor, and A. Sezgin, 《远程短码长过程监测：分辨率与数据新鲜度之间的权衡》，载于 IEEE ICC 论文集，2020年，第1–6页。[5] S. Wang, M. Chen, Z. Yang, C. Yin, W. Saad, S. Cui, and H. V. Poor, 《面向实时物联网系统中信息年龄最小化的分布式强化学习》，IEEE J. Sel. Top. Signal Process., 第16卷，第3期，第501–515页，2022年。[6] A. M. Bedewy, Y. Sun, S. Kompella, and N. B. Shroff, 《多源网络中及时状态更新的最优采样与调度》，IEEE Trans. Inf. Theory, 第67卷，第6期，第4019–4034页，2021年。[7] S. Roth, A. Arafa, A. Sezgin, and H. V. Poor, 《短码长过程监测与调度：分辨率与数据新鲜度》，IEEE Trans. Wirel. Commun., 第21卷，第7期，第4669–4681页，2022年。[8] H. Chen, Y. Gu, and S.-C. Liew, 《面向大规模物联网网络、依据信息年龄进行的随机接入》，载于 IEEE INFOCOM WKSHPS 论文集，2020年，第930–935页。[9] X. Chen, X. Liao, and S. S. Bidokhti, 《随机接入信道上的实时采样与估计：信息年龄及其他》，载于 IEEE INFOCOM 论文集，2021年，第1–10页。[10] M. Calvo-Fullana, C. Ant´on-Haro, J. Matamoros, and A. Ribeiro, 《面向采用能量采集传感器的无线控制系统的随机接入通信》，IEEE Trans. Signal Process., 第68卷，第3961–3975页，2020年。

[11] B. Zhou and W. Saad, 《噪声信道下超密集物联网系统中的信息年龄性能分析》, IEEE Trans. Wirel. Commun., 第21卷, 第5期, 第3493–3507页, 2022年。[12] S. Kaul, R. Yates, and M. Gruteser, 《实时状态: 应该多久更新一次? 》, 载于 IEEE INFOCOM 论文集, 2012年, 第2731–2735页。[13] A. Munari, 《现代随机接入: 不规则重复时隙ALOHA的信息年龄视角》, IEEE Trans. Commun., 第69卷, 第6期, 第3572–3585页, 2021年。[14] P. Calyam, L. Kumarasamy, and F. Ozguner, 《为实现网络监控目标而进行的主动测量语义调度》, 载于2010年国际网络与服务管理会议, 2010年, 第435–438页。[15] K. J. Astrom and R. M. Murray, 《反馈系统: 科学家与工程师导论》。美国: 普林斯顿大学出版社, 2008年4月。[16] Y. Sun, E. Uysal-Biyikoglu, R. Yates, C. E. Koksal, and N. B. Shroff, 《更新还是等待: 如何保持数据新鲜》, 载于 IEEE INFOCOM 论文集, 2016年, 第1–9页。