

无线传感器网络信息质量评估的柔性框架*

郭浩,潘仲明,周靖

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:为建立完整统一的无线传感器网络信息质量评估体系,提出可灵活剪裁的柔性框架来动态地评估无线传感器网络应用中信息的准确性和时效性。该框架基于信息融合理论和时间刻度标记技术,在 sink 节点聚合网络中所有传感器节点的信息。将信息融合结果近似为真值,利用观测信息与融合结果的数值或语义差异分别评估测量数据和决策信息的准确性。根据信息获取的截止期限和延迟敏感性,分三类描述和建模信息时效性,并通过轻量级的信息获取时间测量法量化。采用滑动窗口机制和增量计算方法,动态地更新评估结果。通过仿真三个目标监测应用场景的信息时效性评估和两个环境监测应用场景的信息准确性评估验证了框架的有效性。仿真结果与信息质量参考基准吻合,表明该框架能够灵活地评估不同无线传感器网络应用中信息的准确性和时效性。

关键词:无线传感器网络;信息质量评估;准确性;时效性;柔性框架

中图分类号:TP393 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)01-150-06

Flexible estimation framework for quality of information in wireless sensor network

GUO Hao, PAN Zhongming, ZHOU Jing

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to establish an integrated estimation system for quality of information in WSN (wireless sensor network), a flexible tailorable framework was proposed to dynamically estimate information accuracy and information timeliness in different WSN applications. The framework aggregates all information of the sensor nodes at the sink node on the basis of information fusion theory and timescale marking technique. Through approximating the fusion result to ground truth, the accuracy of measurement data and decision information was quantified by utilizing the numerical/nominal difference between the observed information and the fusion result, respectively. According to application deadline and delay sensitivity of information acquisition, timeliness was classified as three categories for characterization and representation, and quantified through the lightweight measurement of the information acquisition time. The estimation results along the time are dynamically updated by adopting a sliding window mechanism and an incremental calculation algorithm. The effectiveness of the framework was validated by simulations, including timeliness estimation in three target surveillance application scenarios and accuracy estimation in two environmental monitoring application scenarios. Simulation results match with the reference criteria, which demonstrates that the framework can be flexibly tailored to estimate information accuracy and information timeliness in different WSN applications.

Key words: wireless sensor network; estimation of information quality; accuracy; timeliness; flexible framework

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)^[1]为人类观测复杂物理世界提供大量的感知信息。由于传感器节点不一致以及工作环境复杂多变,信息质量(Quality of Information, QoI)具有差异性和随机性,如何动态评估 QoI 对于管理和使用 WSN 的信息具有重要意义。

QoI 通过一组属性来表现。QoI 评估是对 QoI 属性的量化。准确性和时效性是 QoI 的基本属性,与 WSN 应用的性能息息相关。目前在 WSN

的 QoI 研究中,这两个属性虽有相对较好的讨论,但其有效的量化方法仍处于探索阶段。文献[2]系统地介绍了 QoI 属性的定义、分类和组织规范。文献[3]定义了 WSN 数据的准确性和时效性,但并未建模和计算。文献[4-5]针对多传感器监测系统中高级别信息的 QoI,分别建立了准确性和时效性的静态和动态计算模型,但其研究对象不具有通用性。文献[6]全面综述了 WSN 应用中准确性和时效性的度量指标,但都是针对具体

* 收稿日期:2015-04-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61374008,91320202)

作者简介:郭浩(1987—),男,陕西汉中,人,博士研究生,E-mail:gh1415yg@163.com;

潘仲明(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:chungmingpan@163.com

应用设计的。文献[7]利用信任度(准确性)和时效性等指标的加权来评估移动群体感知终端的质量,定义并分析了两种属性,但并未给出量化方法。文献[8]针对参与式感知中用户位置的隐私保护问题,利用真实位置恢复值与保护位置恢复值的均方误差来评估隐私保护机制对于 QoI 的影响。WSN 的广泛应用迫切需要完整统一的量化方法作为 QoI 评估的基础。

1 背景知识

1.1 假设

对 WSN 做如下假设:①传感器节点同构,其上装配 m 种传感器;②中继节点只向前转发,并不处理接收的信息;③网络的通信协议栈能够保证各节点的信息可靠且完整地送达目的节点;④大多数传感器节点具有可接受的信息准确性;⑤传感器节点与 sink 节点保持时间同步。

1.2 问题描述

1.2.1 准确性评估问题

在 WSN 应用中,传感器节点的感知信息要准确地反映目标本体(Ground Truth, GT)。准确性为感知信息与 GT 的吻合程度。由于 WSN 应用一般无法得到 GT,准确性不可能被精确地计算。此外,不同 WSN 应用中准确性的表示也不一致,如下面两种应用场景:

场景 1:在水质参数监测应用中,准确性为测量数据和水质参数真实值间的数值差异。

场景 2:在水质评价应用中,准确性为决策信息和水质真实状态间的语义差异。

因此,第一个研究问题是在没有 GT 的情况下,如何评估不同 WSN 应用的信息准确性。

1.2.2 时效性评估问题

在 WSN 应用中,传感器节点的感知信息要尽快传递到 sink 节点。文献[6]将时效性定义为信息获取时间的指示器。由于网络具有高度动态性和不可预测性,信息获取时间难以精确计算。此外,不同 WSN 应用对于信息的时间敏感性也有差异,如下面三种应用场景:

场景 3:在目标探测应用中,只要在目标离开监测区域前,通过传感器节点的信息触发相机启动,用户就能探测到目标。

场景 4:在目标预警应用中,用户根据传感器节点的信息,在目标离开监测区域前采取行动。及时的信息有助于增加行动成功的概率。

场景 5:在目标知识学习应用中,查询的目标

历史信息可以在任意时间返回至用户,但及时的查询结果能够提高用户学习的效率。

因此,如何在动态网络中评估不同时间敏感性应用的信息时效性是另一个研究问题。

1.3 术语

假设 WSN 的 n 个传感器节点均有唯一编号 (IDentity, ID),取值范围为 $[1, n]$ 。定义如下:

1) 节点信息包(P)是包含有节点 ID(id)、感知信息(s)、融合方法(fus)和产生时刻(t)的信息单元。设 $P_{ii} = (id_i, s_{ii}, fus, t_i)$ 表示传感器节点 i ($1 \leq i \leq n$) 在时间槽 t 产生的节点信息包。

2) 信息级 QoI(q)是单个节点信息包中感知信息的 QoI 评价。设 q_{ii} 表示 s_{ii} 的 QoI 评价,用二元组 $(q_{ii>A}, q_{ii>T})$ 表示,其中 $q_{ii>A}$ 和 $q_{ii>T}$ 分别为 s_{ii} 的准确性评价和时效性评价。

3) QoI 窗口(窗口)是包含连续 W 个独立 q 的分段。设 t 时刻窗口表示以 q_t 截止的窗口。

4) 节点级 QoI (q^W)是单个窗口内全部 W 个独立 q 的综合评价。设 q_{ii}^W 表示传感器节点 i 在 t 时刻窗口的 QoI 评价,表示为 $(q_{ii>A}^W, q_{ii>T}^W)$ 。

2 QoI 评估框架

2.1 信息聚合

在 WSN 应用中,在没有 GT 和其他节点信息做参考的情况下,独立节点的信息准确性很难精确地在本地评估。此外,由于网络的动态性和节点间不可预测的交互作用,独立节点的信息时效性必须通过网络传输才能量化。为了解决独立节点的 QoI 评估问题,框架基于信息融合理论和时间刻度标记技术,在 sink 节点聚合网络中所有传感器节点的信息。在满足假设②,③和④下,各节点的信息最终能够聚集在 sink 节点,信息的时效性与信息传递消耗的总时间密切相关;网络对信息的准确性无影响,可将信息融合结果近似作为 GT。

2.2 信息级准确性评估

在测量目标参量的应用中,假设传感器节点 i 在时间槽 t 产生的 m 种属性测量数据为 $s_{ii} = (s_{ii}^1, s_{ii}^2, \dots, s_{ii}^m)$,对于某一属性 j ($1 \leq j \leq m$),所有节点的测量数据为 $\{s_{i1}^j, s_{i2}^j, \dots, s_{im}^j\}$,融合结果为 s_i^j 。以 s_i^j 作为该属性的近似真实值, s_{ii}^j 的准确性 $q_{ii>A}^j$ 通过 s_{ii}^j 和 s_i^j 的数值差异来评估,可以表示成均方误差、绝对误差或相对误差等的函数 $Q_{\text{err}}(\cdot)$ 。 $q_{ii>A}$ 为所有属性 $q_{ii>A}^j$ 的加权平均:

$$q_{ii>A} = \sum_{j=1}^m w^j \times q_{ii>A}^j / \sum_{j=1}^m w^j \quad (1)$$

由于不同属性测量数据的获取精度存在差异,用权重 w^j 表示 $q_{ii>A}^j$ 对 $q_{ii>A}$ 的影响程度。

在判定目标状态的应用中,假设命题集合为 $\Theta = \{a, b, \dots, l\}$, 传感器节点 i 在时间槽 t 的决策信息为 $s_{ii} = ((pl_{ii}^a, pl_{ii}^b, \dots, pl_{ii}^l), r_{ii})$, 所有节点信息的融合结果为 $s_t = ((pl_t^a, pl_t^b, \dots, pl_t^l), r_t)$, 其中 pl 表示命题的支持概率, $r \in \Theta$ 表示目标状态的语义决策。以 r_t 作为目标的近似真实状态, 根据 r_{ii} 与 r_t 的语义差异来评估 $q_{ii>A}$, 表示如式(2):

$$q_{ii>A} = \begin{cases} 1 & \text{if } r_{ii} = r_t \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

2.3 信息级时效性评估

从应用的角度看,时效性是信息可以被及时利用的程度。根据信息获取的截止期限和延迟敏感性,把不同时间敏感性应用的信息级时效性分为三类建模。假设 T_E 表示信息获取的截止期限, $T_{A>ii}$ 表示 s_{ii} 的获取时间。

类别 1: 应用存在 T_E , 判定在 T_E 内获取的节点信息为及时可用信息, 且具有最高的时效性评价; 超过 T_E 的节点信息没有时效性价值。用二进制模型表示:

$$q_{ii>T} = \begin{cases} 1 & \text{if } T_{A>ii} \leq T_E \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

类别 2: 应用存在 T_E , 判定在 T_E 内获取的节点信息为及时可用信息, 时效性评价与获取时间成反比; 超过 T_E 的节点信息没有时效性价值。用有限衰减模型表示:

$$q_{ii>T} = \begin{cases} Q_{\text{inf}}(T_{A>ii}) & \text{if } T_{A>ii} \leq T_E \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

$Q_{\text{inf}}(\cdot)$ 随获取时间的增加不断降低至零, 下降梯度由延迟敏感性决定, 通常服从多项式函数 $a_n (T_{A>ii}/T_E)^n + \dots + a_1 (T_{A>ii}/T_E) + 1, a_n + \dots + a_1 = -1$ 。

类别 3: 应用不要求 T_E , 判定任意持续时间获取的节点信息为及时可用信息, 时效性评价与获取时间成反比。用无限衰减模型表示:

$$q_{ii>T} = Q_{\text{inf}}(T_{A>ii}) \quad (5)$$

$Q_{\text{inf}}(\cdot)$ 随获取时间的增加逐渐趋近于零, 下降梯度由延迟敏感性决定, 通常服从指数函数或者阶数函数 $1/(1 + \lambda T_{A>ii})^k, \lambda > 0, k > 0$ 。

由于 $T_{A>ii}$ 很难精确计算, 在满足假设⑤下, 框架采用时间刻度标记法 (Timescale Marking Algorithm, TMA), 通过标记 s_{ii} 的产生时刻 t_i 和到

达 sink 节点的时时刻精确地测量 $T_{A>ii}$, 不需理会网络内复杂的处理和传输过程。

2.4 节点级 QoI 评估

q^W 可以表示为一个窗口内 W 个独立 q 的算术平均。如果在每个不重叠的窗口评估, 就无法反映 q^W 在各时间槽上的变化, 这不满足 QoI 动态评估的要求。针对这个问题, 框架采用图 1 的滑动窗机构顺序地丢弃过期时间槽的 q 同时合并新时间槽的 q , 能够在每个时间槽上对 q^W 进行在线评估。同时, 为避免每次窗滑动时都要重新计算, 框架采用一种新的增量方法来计算 q^W , 即利用前一时刻窗口的 QoI 计算当前时刻窗口的 QoI。以 q_{ii}^W 的计算为例, 通过用 q_{ii} 取代 $q_{(t-W)i}$ 以增量地更新 $q_{(t-1)i}^W$, 如式(6)所示。

$$q_{ii}^W = \left(\sum_{t'=t-W}^{t-1} q_{t'i} - q_{(t-W)i} + q_{ii} \right) / W \quad (6)$$

窗口宽度 W : 若设置过大, 用户无法敏感地认知当前 QoI 的变化; 若设置过小, 用户需要频繁地对变化的 QoI 调整响应。

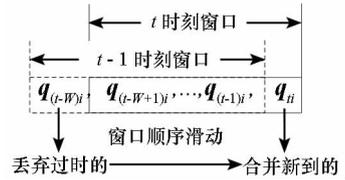


图 1 滑动窗机构

Fig. 1 Sliding window mechanism

3 仿真实验

3.1 WSN 设计

考虑一个拓扑结构如图 2 的 WSN, 包括 1 个 sink 节点 (实心六边形), 10 个传感器节点 (具有编号的实心圆形) 和 20 个中继节点 (空心圆形)。网络满足 1.1 节的假设, 所有节点静止, 相互之间

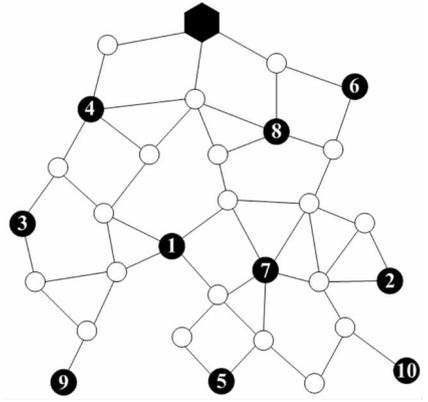


图 2 WSN 的拓扑结构

Fig. 2 WSN topological structure

通过双向多跳的无线链路进行通信。通信模型考虑互斥干扰模型,即共享同一节点的链路不能同时访问物理信道。网络通信协议栈中包括一个基于时分复用的 MAC 协议、基于最小跳数的多径路由协议以及文献[9]提出的可靠传输协议。每个节点都知道自己的直接邻居,任意两个邻居节点之间的距离相等。

3.2 时效性评估

仿真 WSN 在 1.2.2 节描述的三个目标监测应用场景的信息时效性评估,根据结果验证框架的有效性。利用 ns-2 模拟器来构建 3.1 节的模拟网络,传感器节点在每个时间槽产生并发送一个信息包,这些包以最小跳数沿多径路由到 sink 节点。将一个时间槽均分成 35 个链路访问区段,在每个区段,邻居节点的链路可以访问物理信道并传输一个信息包。对于共享链路,按照顺时针循环依次访问信道。所有节点都不发生信息包丢弃和缓冲区溢出。每个信息包都能在一个时间槽内到达 sink 节点。利用热机械分析(ThermoMechanical Analysis, TMA)测量信息的获取时间,然后根据表 1 的仿真参数分别使用式(3)、式(4)和式(5)来评估应用场景 3,4 和 5 的信息级时效性。

表 1 时效性评估仿真参数说明

Tab.1 Simulation parameters of timeless estimation

应用场景	时效性模型(默认值)	T_E/s
3(探测)	二进制模型	12
4(预警)	多项式有限衰减模型 ($Q_{inf}(T_A) = 1 - (T_A/T_E)^4$)	12
5(学习)	指数无限衰减模型 ($Q_{inf}(T_A) = \exp(-0.0067 \times T_A)$)	∞

仿真持续时间为 150 个时间槽,10 个传感器节点信息的最小和最大获取时间如表 2。 W 设置为 100,因此窗口滑动了 50 次。在每个滑动窗口,使用式(6)分别计算三个应用场景的节点级时效性。以表 2 的获取时间作为时效性参考,验证框架在信息时效性评估中的有效性。

表 2 传感器节点信息的最小和最大获取时间

Tab.2 Minimum and maximum information acquisition time of the sensor nodes

节点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
最小/s	5	6	5	2	11	2	5	2	14	8
最大/s	13	10	7	4	35	7	23	7	20	22

图 3~5 分别为 10 个传感器节点在三个应用场景的信息时效性评价,结果与应用场景的时间敏感性吻合。例如,场景 3 中,在目标离开监测区域前(即 T_E 内)获取的信息是完全可用的,图 3 中节点 4,6(或 8),3 和 2 的时效性评价为 1;场景 4 和 5 中,及时的信息可提高应用的性能,图 4 和图 5 中节点 4,6(或 8),3 和 2 的时效性评价按从高到低的顺序依次获得一定数值。又如,场景 3 和 4 中,目标离开监控区域后(即 T_E 外)获取的信息是无用的,图 3 和图 4 中节点 9 的时效性评价始终为 0;场景 5 中,任意时间获取的节点信息都是及时可用的,图 5 中所有节点均获得了 0.84 以上的时效性评价,节点间时效性差异并不显著,说明了本应用的低时间敏感性。

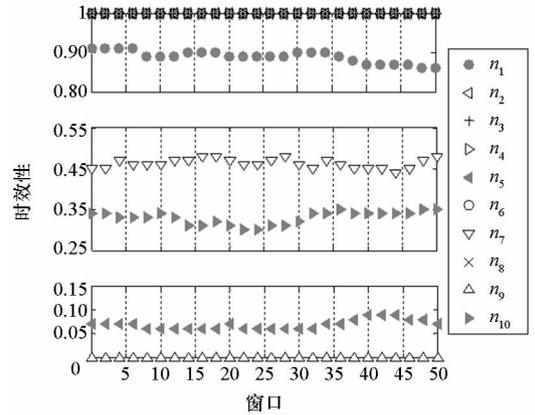


图 3 目标探测应用中的时效性评价

Fig.3 Timeliness estimates in a target detection application

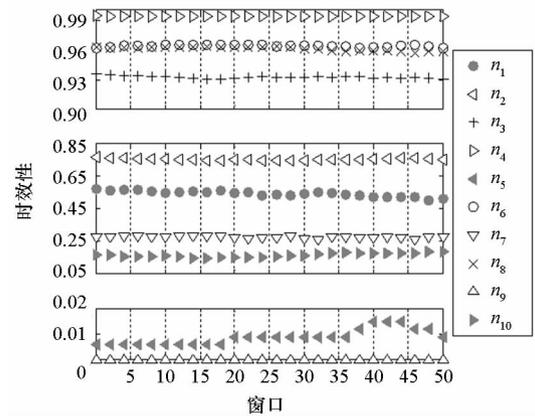


图 4 目标预警应用中的时效性评价

Fig.4 Timeliness estimates in a target warning application

结果还表明信息获取时间不能直接作为时效性的量化指标。例如,节点 4,6(或 8),3 和 2 的信息获取时间互不相同,但在场景 3 中获得了相同的时效性评价(如图 3 所示)。又如,信息获取

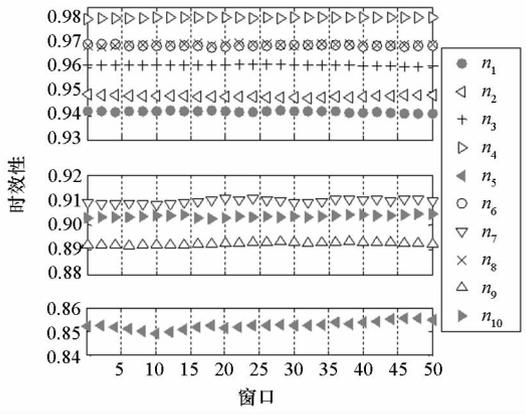


图 5 目标知识学习应用中的时效性评价
Fig.5 Timeliness estimates in a target learning application

时间确定,在场景 3 和 4 中,节点 5 的时效性评价比节点 9 的高(如图 3 和图 4 所示),但这个关系在场景 5 中却相反(如图 5 所示)。因此,将文献[6]的时效性定义完善为信息获取时间在特定截止期限和延迟敏感性下的指示器。

3.3 准确性评估

仿真 WSN 在 1.2.1 节描述的两个环境监测应用场景的信息准确性评估,根据结果验证框架的有效性。由于溶解氧(DO)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、总氮(TN)是污染物的敏感参数,仿真以这 4 个参数作为水质监测和评价的特征向量(DO, NH₃-N, TP, TN)。

3.3.1 仿真设置

参考特征向量:以“中国地表水环境质量标准 GB 3838 - 2002”中 5 级水质的特征向量作为参考特征向量,取值见表 3。

表 3 水质等级的参考特征向量

Tab.3 Reference feature vector of water quality class

	mg/L			
	DO	NH ₃ -N	TP	TN
I	7.5	0.15	0.01	0.2
II	6.0	0.5	0.025	0.5
III	5.0	1.0	0.05	1.0
IV	3.0	1.5	0.1	1.5
V	2.0	2.0	0.2	2.0

测量数据:水质参数监测应用中,通过在某一水质等级的参考特征向量上叠加随机高斯噪声产生传感器节点的 4 种属性测量数据,作为一个数据整体。表 4 为 10 个传感器节点的噪声水平,通过信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)来反映。若

传感器节点出故障(节点 10),其噪声水平为无限大。

表 4 噪声水平

Tab.4 Noise level

节点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SNR/ dB	40	26	20	14	10	8	6	4	0	∞

决策信息:水质评价应用中,命题集合是 $\Theta = \{I, II, III, IV, V, U\}$,其中 U 表示水质等级未知。基于水质参数的测量数据和参考特征向量,各传感器节点对不同命题的支持概率用灰色关联分析^[10]求得,并以具有最大支持概率的命题作为水质评价的语义决策。将支持概率集合和语义决策一起作为传感器节点的决策信息。

仿真的主要参数说明及默认值如表 5 所示。水质参数监测应用中,每个时间槽所有传感器节点同一属性的测量数据利用加权平均融合,权值由测量数据的自支持度和互支持度联合确定^[11]。单种属性测量数据的准确性通过 $Q_{\text{eff}}(\cdot)$ 计算。测量数据整体的准确性使用式(1)计算。水质评价应用中,每个时间槽所有传感器节点的支持概率集合利用具有冲突处理功能的证据理论^[12]融合。基于融合结果确定的语义决策,决策信息的准确性使用式(2)计算。

表 5 准确性评估仿真参数说明

Tab.5 Simulation parameters of accuracy estimation

参数	默认值
f_{us}	加权平均 ^[11] /证据理论 ^[12]
$Q_{\text{eff}}(\cdot)$	$1 - s_i^j - s^j /s^j$
w^j	1
W	100

3.3.2 仿真结果

仿真持续时间为 150 个时间槽,因此窗口滑动了 50 次。在每个滑动窗口,使用式(6)分别计算两个应用场景的节点级准确性。以表 4 的噪声水平作为准确性参考,验证框架在信息准确性评估中的有效性。

图 6 和图 7 分别为 10 个传感器节点在两个应用场景的信息准确性评价,结果与准确性参考即噪声水平吻合。节点 1 的噪声水平为 40,表明原始特征值上几乎没有噪声,因此,测量数据和决策信息会相当准确,在图 6 和图 7 中获得了 0.9

以上的准确性评价。节点 10 的噪声水平为无限大,表明原始特征值已经被噪声完全淹没,因此,测量数据和决策信息会完全错误,在图 6 和图 7 中准确性评价始终保持在 0。可以看出,单个传感器节点的准确性评价有一定波动,这是因为叠加的噪声是随机变化的。

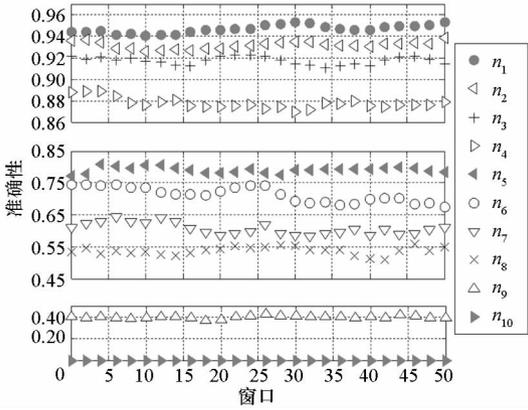


图 6 水质参数监测应用场景的节点级准确性评价

Fig. 6 Estimates of sensor node-level accuracy in a water quality parameters monitoring application scenario

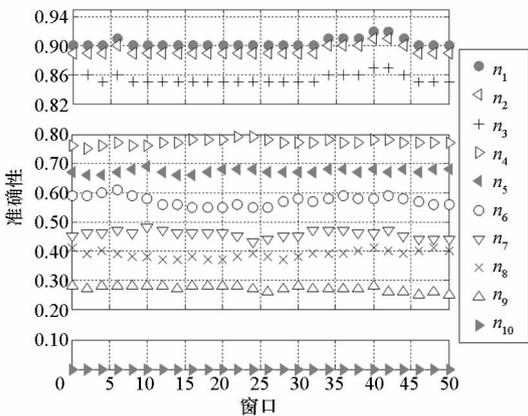


图 7 水质评价应用场景的节点级准确性评价

Fig. 7 Estimates of sensor node-level accuracy in a water quality evaluation application scenario

4 结论

QoI 评估是 WSN 应用的基本需求。重点研究了信息的准确性和时效性,提出一个柔性框架解决这两个属性在不同 WSN 应用中的动态评估问题,得出两个结论:其一,WSN 应用的信息准确性应该根据信息类型分类评估,基于信息融合理论,可以在不需要 GT 的情况下对其进行量化;其二,WSN 应用的信息时效性是由信息获取的消耗时间、截止期限和延迟敏感性共同决定的。通过灵活地定制和剪裁,框架能够适用于不同 WSN 应

用的 QoI 评估,从而在大量感知信息中获得高质量的信息。

参考文献 (References)

- [1] Akyildiz I F, Su W L, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40 (8): 102 - 114.
- [2] Bisdikian C, Kaplan L M, Srivastava M B. On the quality and value of information in sensor networks [J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2013, 9 (4): 1 - 26.
- [3] Hermans F, Dziengel N, Schiller J. Quality estimation based data fusion in wireless sensor networks [C] // *Proceedings of IEEE 6th International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems*, 2009: 1068 - 1070.
- [4] Hossain M A, Atrey P K, El Saddik A. Modeling quality of information in multi-sensor surveillance systems [C] // *Proceedings of the IEEE 23rd International Conference on Data Engineering Workshop*, 2007: 11 - 18.
- [5] Hossain M A, Atrey P K, El Saddik A. Modeling and assessing quality of information in multisensor multimedia monitoring systems [J]. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications*, 2011, 7(1): 1 - 30.
- [6] Sachidananda V, Khelil A, Suri N. Quality of information in wireless sensor networks: a survey [C] // *Proceedings of ICIQ' 10*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2010: 193 - 207.
- [7] Marjanović M, Skorin-Kapov L, Pripuzić K, et al. Energy-aware and quality-driven sensor management for green mobile crowd sensing [J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016, 59: 95 - 108.
- [8] Vergara-Laurens I J, Mendez D, Labrador M A. Privacy, quality of information, and energy consumption in participatory sensing systems [C] // *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, 2014: 199 - 207.
- [9] Shaikh F K, Khelil A, Ayari B, et al. Generic information transport for wireless sensor networks [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing*, 2010: 27 - 34.
- [10] Wei G W. Grey relational analysis model for dynamic hybrid multiple attribute decision making [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2011, 24(5): 672 - 679.
- [11] 司刚全, 张寅松, 娄勇. 考虑自支持度和互支持度的多传感器一致性测度算子 [J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46(10): 20 - 23.
SI Gangquan, ZHANG Yinsong, LOU Yong. Measuring operator considering self-support and mutual-support for estimation consistency of multi-sensor observations [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(10): 20 - 23. (in Chinese)
- [12] 邓勇, 施文康, 朱振福. 一种有效处理冲突证据的组合方法 [J]. *红外与毫米波学报*, 2004, 23(1): 27 - 32.
DENG Yong, SHI Wenkang, ZHU Zhenfu. Efficient combination approach of conflict evidence [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2004, 23(1): 27 - 32. (in Chinese)