

基于订阅分解的无线传感器网络中间件

杨文俊, 汪秉文, 尹安, 胡晓娅

(华中科技大学控制科学与工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 通过分析无线传感器网络的特性及其并发应用的特点, 提出了一种新型消息中间件 EventX, 以便为实际应用提供高效节能的软件平台。首先定义了基于事件驱动的订阅模型, 然后指出 EventX 的体系结构, 并给出了根据时间、类型等对订阅进行分解的模型和算法, 最后为低能量状态的节点设计了一种基于权重的贪婪决策算法。通过仿真测试, 证明其能够减少网络数据传输开销, 延长网络生存时间。

关键词: 无线传感器网络; 消息中间件; 发布/订阅; OMNeT++

中图分类号: TN 915; TP 393

文献标志码: A

Subscription decomposition based middleware for wireless sensor networks

YANG Wen-jun, WANG Bing-wen, YIN An, HU Xiao-ya

(Dept. of Control Science and Engineering, Huazhong Univ. of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the continuing advances in sensor networks and application design, appropriate middleware is needed to provide efficient service for concurrent applications according to the scarce resources and sensor energy. In this paper, we first define the event-triggered based subscription model, and then propose a novel message oriented middleware named EventX to fit the features of sensor networks and its applications. EventX implements an algorithm to analyse and decompose compound subscription according to type and time interval, and another weight information based greed algorithm for the low-power state of nodes. Simulation test results show that the EventX is capable to reduce the communication overhead and extend the lifetime of sensor networks.

Keywords: wireless sensor networks; message oriented middleware; publish/subscribe; OMNeT++

0 引言

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)通过节点之间的无线通信, 将节点采集到的各种监测数据传输至最终的处理程序并呈现给用户。由于网络中节点众多, 实时并发数据量较大, 如何在网络资源和节点能量限制下进行高效的数据采集、传输和处理, 是无线传感器网络研究领域一直关注的问题。与此同时, 由于无线传感器网络本质上基于事件驱动, 节点数据的监测和传输是由监测事件或查询事件触发而产生, 因此使用消息中间件^[1], 通过主题的发布与订阅就可以一次或周期性地从网络中获取监测信息, 可减少传统请求-响应模式的重复数据通信开销, 减轻网络过载或拥塞。早期的一些基于消息和事件的 WSN 中间件已取得了一定的研究成果^[2-4], 如 Mires^[5]为无线传感器网络引入了订阅/发布机制, DSWare^[6]则探讨了一种以数据为中心的事件探测服务机制, 但这些中间件对事件的探测与处理均较为简单, 诸如包含时空关系的复杂事件还需要更为严密的处理机制。

本文将消息中间件与无线传感器网络的具体应用要求相结合, 提出了一种进行订阅分解与合成的新型消息中间件 EventX。EventX 能将复杂的时间、类型等相关的复合主题事件分解为简单的监测、查询事件, 并排除其中冗余的部分, 以形成若干个彼此独立的子订阅, 从而避免数据的重复采集与传输。同时, 引入订阅以及子订阅权重机制及相关的调度算法, 保证在资源有限的情况下优先处理重要的订阅, 以提高系统应对多个订阅的服务质量。当监测数据获取后, 再合成已分解的子订阅, 重复订阅可以充分利用现有数据以提高数据有效性增益。仿真测试表明, 该中间件能够在保证数据采集效率的前提下, 有效减轻网络负载, 延长系统生存时间。

1 模型与定义

1.1 发布/订阅模型

发布/订阅模型描述了如何表达对事件的兴趣和事件通知的选择机制, 刻画了“发布/订阅”系统的表达能力。在 EventX 中, 通过一个二元组来描述订阅主题, $T ::= \{ TID,$

收稿日期: 2008-11-27; 修回日期: 2009-03-06。

基金项目: 国家自然科学基金(60773190, 60802002)资助课题

作者简介: 杨文俊(1981-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络和网络通信。E-mail: yangwjn@163.com

Type}。TID 是该主题的唯一标识符,仅有逻辑意义。Type 则表示该主题对应于何种监测事件。

对于任意一个主题的订阅,我们可以用 $SUB ::= \{ SID, TID, Range, Duration, Deadline \}$ 来表示,其中 SID 表示订阅的逻辑标识符,TID 表示订阅对应的主题 ID,Range 表征订阅的目的地集合,Duration 表示订阅的持续时间;Deadline 表示订阅结束后数据提交的截止时间。

1.2 传感器网络模型

对于网络中存在的大量节点,统称为远程对象,用以表示订阅消息的最终目的地,它可以通过一个三元组来表示, $RO ::= \{ RID, Locat, State \}$ 。RID 表示该对象的唯一标识符,它只具有逻辑意义,即无法通过 RID 对具体的对象进行定位。Locat 用以表示该对象所处的实际位置,当传感器网络提供相关的定位算法时,可用于表示地理位置,否则只能表示对象之间的相对位置或直接空置。State 表示远程对象的状态:待命态、监测态、休眠态和失效态。待命态表示节点未进行任何的目标监测和数据发送工作,可接收相关的命令开始工作,而监测态则表示当前节点正在进行监测和数据发送。

1.3 待解决的问题

在上述模型刻画中,由于系统允许多个订阅同时存在,因此存在以下待解决的问题:

(1) 资源竞争的问题:多个订阅会使得节点在进行数据采集和处理时争夺有限的资源,从而导致单个节点服务质量的降低,必须对订阅进行调度,尽可能地提供服务。

(2) 数据冗余与复用的问题:节点上每个订阅均会产生一个监测事件集合,当存在多个订阅时,监测事件会出现冗余现象,需要在保证数据正常获取的前提下实现数据的复用,以减小通信开销,节省能量。

2 Event 消息中间件的体系结构与实现

2.1 体系结构

EventX 核心工作是对各种事件进行监测和管理,依托底层的嵌入式操作系统,EventX 还需要进行相关的数据管理、QoS 调度和路由控制等工作,如图 1 所示。对于节点的所有外部应用,如查询、监测控制等,都可以抽象视为对该对象的订阅操作,由发布/订阅管理器统一进行管理。

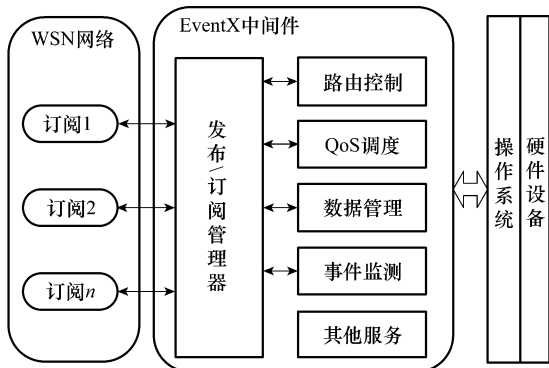


图 1 EventX 结构框架

2.2 订阅分解

由于对节点的操作基本可以抽象为对节点的订阅操作,当存在多个订阅时,如果订阅的颗粒度过大,那么在订阅之间就会出现订阅重叠,如图 2 所示。

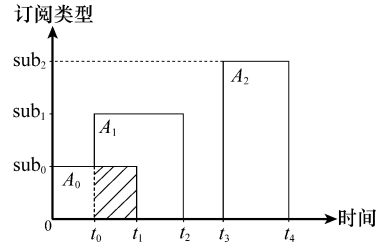


图 2 重复订阅

在图 2 中,横坐标表示系统的运行时间,纵坐标表示订阅类型。所订阅的主题将决定某段时间内节点的具体事件监测情况。节点的工作通常包括数据采集、处理和数据发送,它们均与订阅类型和时间正相关,因此工作时的能耗可以近似地用图 2 中时间与主题订阅类型所围的矩形面积来表示。图 2 中存在三个订阅,0-t1 时间段内订阅了 sub0,由 A0 表示;t0-t2 时间段内订阅了 sub1,由 A1 表示;t3-t4 时间段则需要处理 sub2 的订阅,由 A2 表示。由图可知,由于 t0 < t2,导致 A0 与 A1 出现了重叠,此时运行时能耗等效为 A0UA1UA2。于此同时,由于需要将监测数据发送至 Sink 节点,这些重复的数据传输还会带来网络阻塞。

分析图中的主题,有 sub0 ⊂ sub1 ⊂ sub2,即存在主题颗粒度过大的现象,从而导致主题之间出现包含或重叠。因此为了实现对事件内容的精细分类与监控,基于主题的“发布/订阅”应该对主题进行详细的定义和细化,将主题划分成多个子主题,订阅者根据子主题进行订阅声明,这样既可以减少收到不感兴趣的事件的几率,也可以防止节点进行过多的重复操作。此时,使用 $PT ::= \{ PTID, Type \}$ 来表示一个不可再分元主题(primitive topic, PT),多个 PT 可以组成一个复合主题 $PT ::= \{ TID, PTSet \}$ 。

由于订阅与时间正相关,因此仅仅对主题进行划分并不能完全解决重复订阅的问题。在此,引入一个新的运算符“>>”和“^”来辅助进行时间跨度的判断。设 $T = [t_b, t_e]$, t_b 为订阅起始时间, t_e 为订阅结束时间,且有 $t_b < t_e$ 。运算符“>”、“>>”和“^”所表达的含义分别为

$$T_2 > T_1 \doteq t_2^b > t_1^e \tag{1}$$

$$T_2 \gg T_1 \doteq t_2^b \geq t_1^e \cap t_2^e \geq t_1^b \cap t_2^e \leq t_1^e \tag{2}$$

若 $T_2 \gg T_1$ 成立,则有

$$T_2 \wedge T_1 \doteq [\max(t_1^b, t_2^b), \min(t_1^e, t_2^e)] \tag{3}$$

图 3 列举了三个时间跨度, T_0, T_1, T_2 。由式(1)~式(3)可得,此时 $T_1 > T_0, T_2 > T_0$,且 $T_2 \gg T_1, T_2 \wedge T_1$ 的结果为图中虚线之间的时间跨度 $[t_2^b, t_1^e]$ 。

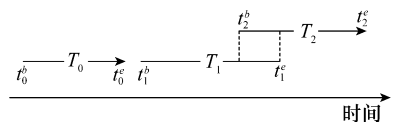


图 3 主题订阅的时间跨度

通过对主题类型和订阅时间跨度的定义与分解,一个较为复杂的订阅即可分解为若干个简单的订阅,而两个或多个订阅也可以通过这种方式检验出它们所共有的子订阅。例如,假设对同一片节点区域,有两个订阅 SUB_0 ($TID_0, T_0 [t_0^b, t_0^e], \dots$) 和 SUB_1 ($TID_1, T_1 [t_1^b, t_1^e], \dots$), 它们对应的订阅主题集分别为 $PTSet_0$ 和 $PTSet_1$ 。可以通过如下算法检验这两个订阅是否包含重复的子订阅

GET_REDUCEDuplicate_Subscriptions()

```

{
  IF  $T_0 > T_1$  OR  $T_1 > T_0$ 
    THEN 无重复订阅
  ELSE
    {
      IF  $PTSet_0$  与  $PTSet_1$  交集为空
        THEN 无重复订阅
      ELSE
        { 设  $PTSet_r$  为  $PTSet_0$  与  $PTSet_1$  的交集,  $T_r = T_0 \wedge T_1$ ;
          则,当前的重复订阅为  $SUB_r(PTSet_r, T_r)$ ;
        }
      }
    }
}

```

值得注意的是,订阅的分解既可以在节点上进行,也可以在用户程序(运行在传感器网络之外,控制或调用传感器网络数据的其他应用程序)上进行。在节点上进行时,由发布/订阅管理器来控制,它会将复合订阅根据时间和类型分解为子订阅,再对其他组件和底层进行调度。而在用户程序上进行时,还需要综合考虑订阅的作用节点。当订阅的 Range 不相交时,可以完全按照上文中的算法进行处理;而当 Range 中有重复节点时,只需要针对重复的节点使用该算法。因此,复杂的复合订阅可以合理地根据类型、时间和节点进行分解,以去掉重复订阅。

2.3 主题的发布与订阅

根据已定义的元主题 PT,每个节点均可以根据自身的硬件配置情况发布元主题。当网内节点同质,且节点上各传感器工作正常时,每个节点发布的主题是一致的。随着系统的长时间运行,某些传感器可能失效或损坏,此时节点需要停止发布相关的主题。

主题的发布与网络的路由协议和拓扑控制有关。当网络中使用类似于 LEACH^[7] 或 APTEEN^[8] 等路由算法,在逐步掌握整个网络的拓扑结构的同时,还可以进一步获取各节点主题的发布情况,此时发布/订阅控制器模块与路由控制模块协作完成这一部分的工作。明确的拓扑结构使得用户能够直观地对感兴趣的主题进行订阅以获取需要的监测数据。若需要订阅复合主题才能完成数据收集和事件监测,则会对该复合主题进行分解,并记录下复合订阅-子订阅之间的映射关系,然后再向无线传感器网络发送订阅消息。

2.4 订阅执行与数据处理

节点主题得到订阅后,发布/订阅控制器会通知其他模块和操作系统对相应的数据进行采集。如果节点能量将要耗尽,无法完成所有的数据采集工作,或网络传输带宽有限,无法在规定的截止时间内发送全部数据时,将采用一种基于权重的贪婪算法来做出决策。

假设复合订阅 S 可分解为 n 个子订阅 $\{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$, 并对 S 与其子订阅根据重要程度赋以权值。例如, S 的权重为 Ψ , 子订阅的权值分布为 $\{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n\}$, 且有

$$\Psi = \sum_{i=1}^n \omega_i, \text{ 其算法如下。}$$

SCHEDULE_TASK()

```

{
  分解所有复合订阅,获得子订阅集合  $\{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$ ;
  计算子订阅的权值集合:  $\{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n\}$ ;
  将  $\{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n\}$  按递减顺序进行排序,若其中有两值相等,则将 Deadline 较小或能量消耗较少的排列在前;
  获得按优先级排序的子订阅集合  $\{s'_1, s'_2, s'_3, \dots, s'_n\}$ ;
}

```

获得子任务序列后首先处理优先级较高的子订阅,以保证网络畅通并延长网络生存时间。即由应用来适应实际的传感器监测网络,而不是由传感器网络适应应用,提高了系统的实时 QoS。

2.5 子订阅合成

由于在订阅分解时已对复合订阅与子订阅建立了映射,收到相关数据信息后,可将子订阅的数据合成为复合订阅所需的数据,从而进行下一步处理或呈现。对于已接收的数据,可以通过用户进行保存。进行历史数据查询时即可查询到旧有的订阅事件,如果存在重合域则可直接调用已有的数据。

3 仿真与分析

3.1 仿真模型

在无线传感器网络的信息交换过程中,能量消耗由节点无线模块的发送能耗 E_t 、接收能耗 E_r 和节点的感知能耗 E_c 、运算能耗构成 E_c ^[9]。相对于 E_t 、 E_r 和 E_s 来说, E_c 相对较低,可以忽略不计,而传感器模块的感知能耗 E_c 对于不同的模型基本相同。因此,在本文的仿真中只关注与传送次数成正比的无线收发能耗 E_t 、 E_r , 并以此作为节点能量消耗模型的基础,将网络节点生存时间和单个节点平均能量消耗作为主要的研究对象^[10-11]。

为了评估 EventX 消息中间件对无线传感器网络带来的影响,本文使用 OMNeT++ 仿真平台^[12] 实现了 EventX 的部分组件,其中包括发布/订阅管理器、数据管理与 QoS 调度等模块,同时构建了基于 LEACH 的分簇协议。为便于比较不同模式下的系统性能,采取三种不同数据采集与发送策略:第一种会对复合订阅进行分解并去除重复部分;第二种则采取普通消息中间件的处理模式并提交所有的订阅数据;第三种为无 EventX 中间件的 LEACH 系统,此时会采集并发送所有数据。依照以上三种不同方式采集数据信息并传送到用户应用,并定时统计每轮活动的节点数目和节点能耗。仿真中的相关参数详见表 1。

表 1 仿真参数

场景大小/m ²	仿真时间/h	节点数量(个)	节点初始能量/J	节点间距/m	节点通信半径/m
100×100	2	11×11	2	10	20

3.2 仿真结果分析

从图 4 可知,在订阅简单元主题的情况下,普通消息中间件(Normal MOM)和 EventX 性能基本一致,只是在运行较长时间后,由于 EventX 根据节点资源自动调整处理策略以节约能量,从而加大了网络的整体生存时间。而纯粹的 LEACH 系统由于对数据发送没有任何的取舍,使得能量消耗过快,网络生存时间最短。由图 5(a)可知,当订阅主题更为复杂,出现 30%的重复订阅后,EventX 由于避免了不必要的通信消耗,其性能明显优于普通消息中间件的处理模式。EventX 的节点能量保有程度高于普通中间件系统和纯 LEACH 系统,如图 5(b)所示。当节点能量所剩不多时,EventX 仅执行高优先级的订阅任务,使得单节点的平均生存时间最长。

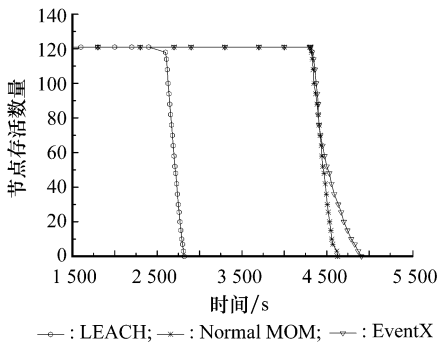
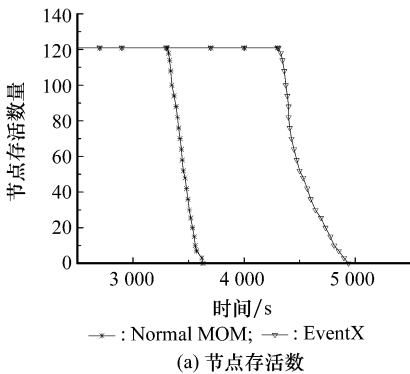
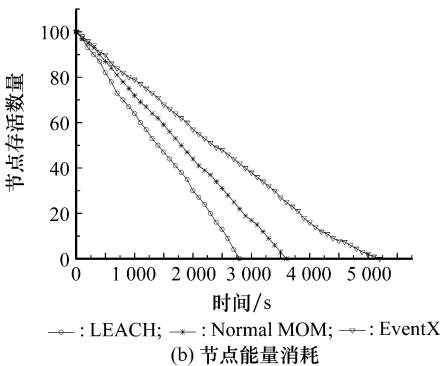


图 4 订阅元主题时生存节点数比较



(a) 节点存活数



(b) 节点能量消耗

图 5 订阅复合主题时生存节点数与能耗比较

4 结论

受传感器节点资源和计算能力的限制,开发适用于无

线传感器网络的分布式应用难度很大。本文提出了一种适用于 WSN 的新型消息中间件系统 EventX,它采用发布/订阅异步通信模型,并根据时间、空间和类型对订阅分解以排除重复部分,使得它比传统请求-响应模式更适应于 WSN 应用的事件驱动本质。通过仿真测试,证明其能够减少网络数据传输开销,延长网络生存时间。下一步需要进一步研究数据融合在 EventX 中间件中的应用,以及不同的网络拓扑结构和路由算法下最优的发布/订阅机制。

参考文献:

- [1] Guruduth B, Tushar C, Robert S, et al. A case for message oriented middleware[C]//*Proc. of the 13th International Symposium on Distributed Computing*, Bratislava: Springer, 1999: 1-18.
- [2] Hadim S, Mohamed N. Middleware challenges and approaches for wireless sensor networks[J]. *IEEE Distributed Systems Online*, 2006,7(3):1541-4922.
- [3] Henricksen K, Robinson R. A survey of middleware for sensor networks: state-of-the-art and future directions[C]//*Proc. of the International Workshop on Middleware for Sensor Network*, Melbourne: ACM Press, 2006:60-65.
- [4] Souto E, Guimares G, Vasconcelos G, et al. Mires; a publish/subscribe middleware for sensor networks [J]. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2006(10),1:37-44.
- [5] Wang M M, Cao J N, Li J, et al. A survey: middleware for wireless sensor networks[J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2008,23(3):305-326.
- [6] Li Shuoqi, Lin Ying, Stankovic J A, et al. Event detection services using data service middleware in distributed sensor networks[J]. *Telecommunication Systems*, 2004,26(6):502-517.
- [7] Azim M A, Kibria M R, Jamalipour A. An optimized forwarding protocol for lifetime extension of wireless sensor networks [J]. *Wireless Communications & Mobile Computing*, 2009, 9(1):103-115.
- [8] Manjeshwar A, Zeng Q A, Agrawal D P. An analytical model for information retrieval in wireless sensor networks using enhanced APTEEN protocol [J]. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2002,13(12):1290-1302.
- [9] Mahfoudh S, Minet P. Maximization of energy efficiency in wireless ad hoc and sensor networks with SERENA [J]. *Mobile Information Systems*, 2009,5(1):33-52.
- [10] 米志超, 周建江. 一种能量均衡的无线传感网络生命周期优化算法 [J]. *系统工程与电子技术*, 2008,30(12):2477-2480. (Mi Zhichao, Zhou Jianjiang. Energy balanced optimization algorithm for maximizing network lifetime in wireless sensor networks [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30 (12):2477-2480.)
- [11] Xue Y, Cui Y, Nahrstedt K. Maximizing lifetime for data aggregation in wireless sensor networks [J]. *Mobile Networks & Applications*, 2005,10(6):853-864.
- [12] Xian Xiaodong, Shi Weiren, Huang He. Comparison of OMNET++ and other simulator for WSN simulation[C]//*Proc. of Industrial Electronics and Applications*, 2008:1439-1443.