物联网体系结构模型与互连机理

马华东*, 宋宇宁, 于帅洋

北京邮电大学智能通信软件与多媒体北京市重点实验室, 北京 100876

* 通信作者. E-mail: mhd@bupt.edu.cn

收稿日期: 2013-09-10; 接受日期: 2013-10-09

国家重点基础研究发展计划 (973) (批准号: 2011CB302701)、国家自然科学基金 (批准号: 61133015)、国家杰出青年基金 (批准号: 60925010) 和国家创新研究群体科学基金 (批准号: 61121001) 资助项目

摘要 网络实现了信息资源的共享, 极大地改变了人们的生产生活方式. 物联网将网络从信息空间进一步向物理空间延伸, 通过对物理环境的感知与控制, 丰富了人类认识世界与改造世界的手段. 本文首先提出了包括对象感控层、数据交换层、信息整合层和应用服务层等 4 个层次的物联网体系结构功能模型, 并对体系结构模型及各层实体进行了面向对象的描述. 对于物联网系统中最为核心的网元互连问题, 我们兼顾考虑强弱网元间的互连互通和网元与物理对象间的互动互操作, 提出了支持强弱网元共存的物联网互连模型和基于能力映射与任务迁移的强弱网元互连机制. 论文通过原型系统对提出的互连模型和互连机制进行了验证.

关键词 物联网 体系结构 互连模型 弱网元 原型系统

1 引言

物联网将物理世界网络化、信息化, 对传统的分离的物理世界和信息空间实现互连和整合, 大大增强了人类与客观世界的交互. 作为未来网络发展趋势, 物联网是一个基于互联网、传统电信网等信息承载体, 让所有能够被独立寻址的普通物理对象实现互联互通从而提供智能服务的网络. 它具有普通对象设备化、自治终端互联化和普适服务智能化等重要特征^[1].

物联网体系结构指物联网系统的组成及相互之间关系, 物联网体系结构的设计要遵循以下原则: 首先, 物联网须能够与现有的网络进行互连与融合. 无论从硬件基础设施、软件应用系统还是用户方式方面, 互联网、传感网、移动通信网等现有网络都已深入了人类生产、生活, 与现有网络兼容互通是物联网体系结构设计的基本要求之一. 其次, 物联网体系结构的设计须与未来互联网体系结构的设计在方向上基本一致. 针对现有互联网存在的一些问题, 下一代互联网的研究正在开展. 未来互联网的具有代表性的先进理念, 设计物联网体系结构时需要借鉴. 另外, 物联网体系结构须充分考虑物联网自身的重要特征, 特别是物联网中的网元能力差异性、网络环境动态性等特点.

本文以现有分层网络体系结构为参考, 提出了一种物联网体系结构 4 层模型, 即对象感控层、数据交换层、信息整合层和应用服务层, 并利用面向对象的方法对物联网体系结构模型进行了详细的刻画. 对于物联网系统中最为核心的网元互连问题, 本文借鉴未来互联网研究的理念, 设计了支持强弱

引用格式: 马华东, 宋宇宁, 于帅洋. 物联网体系结构模型与互连机理. 中国科学: 信息科学, 2013, 43: 1183–1197, doi: 10.1360/N112013-00162

网元共存的物联网互连模型. 针对物联网中广泛存在的弱网元, 本文提出了基于能力映射与任务迁移的弱网元与强网元互连机制, 我们搭建了原型系统, 对本文提出的互连模型和互连机制进行了初步的验证与演示.

本文第 2 节介绍了物联网体系结构模型与互连机理研究的相关工作, 第 3 节对物联网体系结构 4 层功能模型进行详细描述, 第 4 节从互连机理方面提出了物联网互连模型和针对弱网元的互连机制, 第 5 节展示了原型系统和互连机制初步验证结果, 第 6 节进行总结并展望了未来工作.

2 相关工作

下一代互联网和物联网是未来网络研究密切相关的两个方面, 本节将分别对它们的相关工作进行介绍.

2.1 下一代互联网研究

针对互联网面临着编址、路由、流量控制等诸多方面挑战, 下一代互联网的研究正在广泛开展, 包括演进式的 LISP^[2]、CDN^[3]、Mobile IP^[4] 等, 革命式的 NewArch^[5], GENI^[6], FIND^[7], MobilityFirst^[8,9], NEBULA^[10] 等. 其中, 以信息为中心的网络体系结构 (information centric networking, ICN)^[11] 取得了较大的进展, 是未来互联网研究的一个重要方向. 例如, Koponen 提出的 DONA (data oriented network architecture) 侧重于信息传播, 它使用能够自我验证的非层次化的扁平命名空间, 数据源节点提供的对象可以被复制到多个服务器, 可通过任播路由来检索数据对象^[12]. 但是扁平命名不便于用户读写、记忆和使用, 为方便使用, 需要借助于用户可识别名字空间到扁平命名的名字空间的映射机制. 欧盟 FP7 中关于未来网络架构研究的 NetInf (network of information) 强调未来的网络应该以信息的命名和路由为中心, 在内容命名上采用和 DONA 类似的扁平命名, 采用近似网络拓扑的多层 DHT 实现命名解析, 以此应对扁平命名和大量内容引起的扩展性问题^[13]. PSIRP (publish-subscribe internet routing paradigm)^[14] 及其后续项目 PURSUIT (publish-subscribe internet technology)^[15] 认为在未来网络体系结构中, 用户主要通过发布/订阅模式来寻找和检索所需要的数据. 在 PSIRP/PURSUIT 中, 发布和订阅通过 Rendezvous system 进行匹配, Rendezvous 的功能是在网络中定位发布内容和范围. 中国科学院计算技术研究所也开展了相关研究, 提出 SOFIA (service-oriented future internet architecture), 在该体系结构中, 网络不仅仅被看作传输通道, 也是被看作服务池, 将标识的服务作为协议栈的“细腰”. 它通过服务迁移技术实现服务本地化, 解决互联网流量激增问题; 通过标识和地址分离有效支持泛在计算^[16]. 此外, 国际上一些研究项目在互连模型的设计中兼顾考虑主机和信息, 其中具有代表性的有 XIA (expressive internet architecture), ChoiceNet 等. XIA 不再局限于对某种特定通信场景的支持, 而是针对当前网络通信中的参与者 (主机、内容、服务等), 定义一种可扩展的数据平面, 承载各种参与者之间的通信模式, 对每种通信规则定义一个“细腰”, 用户通过指定适当“细腰”表达通信意愿, 从而支持可演进的网络体系结构^[17,18]. Tilman Wolf 提出了 ChoiceNet, 该体系结构将“选择”作为核心原则. “选择”意味着使用网络的实体可以从不同功能、性能和成本的大量可选服务中进行选择, 用户可以对不同层次上的服务或协议进行选择^[19,20].

在以信息为中心的网络体系结构研究中, Van Jacobson 提出的 CCN (content centric networking)^[21] 以及采用相同技术思路的 NDN (named-data networking) 项目^[22] 对物联网的体系结构设计尤为具有借鉴意义. CCN 采用以内容为中心的工作模式, 对内容进行层次化命名, 在 CCN 路由器中实现缓

存功能. 因此, 网络中关心的主体不再是内容在哪里, 而是内容是什么, 即用户所需内容本身而不是从哪里或哪个网元获取该内容. CCN 包含兴趣包和数据包两种结构化协议包, 采用请求者驱动的工作模式. 请求者通过发送兴趣包来获得所需要的内容, 中间路由器转发兴趣包并找到所请求内容的提供者之后, 将数据包按照兴趣包所经路径逆向返回请求者, 并在沿途路由器上缓存该内容. 基于对内容命名的设计可直接满足应用需求, 无需中间件实现从 IP 地址到所需内容的映射, 简化网络架构设计; 通过在中间路径上路由器中缓存命名内容, 便于后续请求就近获取数据, 达到避免拥塞、优化流量的目的. CCN 继承了很多 IP 设计的方法论, 如细腰结构模型、控制面和转发面分离, 以及强调对于路由器和交换机转发引擎技术的重用. CCN 模型与现有网络模型具有较好的兼容性, 对内容分发具有优势, 并能很好地支持流量的可扩展性.

2.2 物联网体系结构研究

从研究对象角度来看, 国内外对物联网的研究可分为两类, 一类是从“物”的角度对物联网网元的感知和控制功能、标识、接入等方面进行研究; 另一类是从“网”的角度对物联网的互连机理、异构网络互通等方面开展研究. 在物联网体系结构方面, 大体分为两种研究视角, 一是物联网整体功能结构; 二是物联网系统的关键技术问题.

整体功能结构研究视角主要目标是对网络系统组成进行清晰的划分. 韩国电子与通信技术研究所 (ETRI) 在 IUT-T 下一代网络全球标准举措会议上提出的 USN 体系结构将物联网从功能角度分为 5 个层次, 自底向上分别为感知网、接入网、基础网络设施、中间件和应用平台^[23]. 这种垂直划分对物联网的功能层次组成进行了明确的定义, 被国内外研究团队广泛参考和借鉴. 但是 USN 并没有对各层次之间的接口进行统一的详细规定, 对工业界的具体设计与实现缺乏指导意义. 美国弗吉尼亚大学也是从功能层次上对物联网进行划分, 并提出了 Physical-net. 它将物联网的感知和控制抽象为服务, 自底向上分别为服务提供层、网关层、协调层和应用层. 不同于 USN 体系结构, Physical-net 对各层之间的调用接口和调用方法进行了统一的规定, 有利于指导实际物联网系统的设计与实现^[24]. 欧盟的 FP7 计划针对物联网提出了 IoT-A 体系结构和 SENSEI 体系结构. IoT-A 体系结构模型参考互联网的细腰结构模型, 包括无线通信协议层、M2M 接口层、IP 层和应用层. 它通过建立一个统一的 M2M 接口层, 屏蔽底层的异构通信方式^[25]. SENSEI 体系结构将物联网分为通信服务层、资源层和应用层 3 个层次^[26]. 与 Physical-net 类似的是, 它没有将物联网底层特有的感知网单独划分出来, 而是将其抽象为资源. 资源层是该体系结构的核心, 它对物理空间中的信息和服务进行资源建模, 并定义了资源的创建、管理、处理、检索等功能规范, 有利于与现有网络进行融合, 并具有较好的可扩展性.

作为最早研究物联网的团队之一, 美国麻省理工学院 Auto-ID 实验室从 RFID 感知技术出发研究物联网, 旨在把存储物品通过 RFID 标签与互联网相连. Auto-ID 实验室于 1999 年提出 Network Auto-ID 体系结构, 并应用于物流系统^[27]. 2003 年美国统一代码委员会 UCC 和国际物品编码协会 EAN 基于 Auto-ID 中心的 EPC (electronic product code) 标识技术, 成立了全球性非盈利组织 EPCglobal 来管理和实施 EPC 的工作, 目标是搭建一个可以自动识别任何地方、任何物品的开放性全球网络. EPCglobal 体系架构被国际上多个研究团队和组织所采用^[28]. uID IoT 是日本东京大学提出的物联网体系结构, 该体系结构在将物体的标识作为研究的重点. 同时, 还考虑了物联网的环境感知特性. 然而从广泛意义来讲, 物联网显然不仅仅包含 RFID 等标识技术, 从标识角度对物联网进行研究虽然取得了显著的成果, 但缺乏对物联网整体结构的全面设计与构建^[29]. 欧洲电信标准组织 ETSI 建立的 M2M 体系结构也是针对物联网提出的, 它的研究侧重于机器和机器之间的通信问题. 它将机器的功能

表 1 物联网体系结构相关研究

Table 1 The related work of IoT architecture

Project	Organization	Description
USN	ETRI, Korea	5 layers including sensor networks, access networks, NGN, USN middleware, USN applications and services
Physical-net	UVA, USA	4 layers including service provider tier, gateway tier, negotiator tier, application tier
IoT-A	FP7, European commission	Shielding the underlying heterogeneous communication mode by M2M interface layer
SENSEI	FP7, European commission	3 layers including communication service layer, SENSEI resource layer, application layer
Networked Auto-ID	MIT, USA	Realizing the communication between network elements from RFID view
uID IoT	University of Tokyo, Japan	Considering both the identification and context
M2M	ETIS, EU	Designing service capacity layer, and defining intrafaces and interfaces of machines
AOA	UPMC, France	4 planes including data plane, control plane, knowledge plane, management plan

抽象为服务资源, 建立了服务能力层, 并详细定义了机器内部应用层与该层的访问接口, 以及机器与机器之间对应层次的交互接口^[30]. 法国巴黎第六大学从数据传输角度出发, 提出了自主体系结构 AOA. 该体系结构包括 4 个平面, 即数据面、控制面、知识面和管理面, 其中知识面是 AOA 最重要的平面, 它提供了整个网络信息的完整视图, 并提炼成为网络系统的知识, 用于指导控制面的适应性控制^[31]. 物联网体系结构研究的相关工作总结如表 1 所示.

物联网关键技术涉及感知、组网、传输、信息处理、中间件、服务、安全、诊断测试等方面, 限于篇幅, 本文不再展开讨论. 将物联网关键技术问题作为主线进行针对性研究, 是建立适应物联网系统特点的技术体系的重要途径.

3 物联网体系结构模型

本文首先对物联网体系结构功能层次结构进行划分, 如图 1 所示. 我们提出的物联网体系结构功能模型包括 4 个层次, 即对象感控层、数据交换层、信息整合层和应用服务层. 一方面, 物联网为用户提供物理空间中的实体状态信息的服务. 感知设备通过对物理对象的感知得到原始感知数据; 经过标识的原始感知数据通过传输通道进行交换, 并将具有标识的信息提供给信息处理器; 信息处理器对具有标识的信息进行整理和融合, 得到具有语义的信息; 应用服务器将具有语义的信息通过信息服务提供给用户. 另一方面, 用户通过物联网实现对物理空间中实体进行控制. 用户利用应用服务器提供的知识生成控制数据, 并经过传输通道的交换, 将可解析的控制数据传输给相应的控制器, 进而实现对物理对象的控制.

3.1 对象感控层

与物理空间具有紧密的联系是物联网区别于其它网络的重要特点, 对象感控层并不包括在传统的

图 1 物联网体系结构对象化描述

Figure 1 The object-oriented design of IoT architecture

互联网体系结构中. 物联网通过设备化的网元, 以感知和控制两种交互方式, 对物理空间对象进行信息的获取与行为的实施. 物联网感控的对象是物理空间中的物理实体, 感控的主体是感知设备和控制设备. 感知设备利用传感技术、条形码技术、多媒体采集技术等, 对物理空间中的对象进行感知, 得到能够被网元所理解和使用的数据. 其感知过程主要包括对被测量的感知, 将被测量转换为电信号, 以及对感知数据的发送. 感知设备可以分为标量传感器和媒体传感器. 标量传感器根据敏感元件和原理的不同可分为物理传感器、化学传感器和生物传感器. 媒体传感器包括音频传感器和摄像头等视频传感器. 控制设备通过理解来自其它功能层次的控制信息, 对物理空间对象执行明确的功能性行为. 作为对象感控层的功能实体, 控制设备可分为组合逻辑控制器和微程序控制器. 我们通过对对象化方法, 将对象感控层的实体进行形式化表示, 其类图如图 2(a) 所示.

3.2 数据交换层

数据交换是物联网系统的关键功能, 它通过有线或无线、单跳或多跳、常连接或间歇式连接等各种不同的方式, 实现结构化的信息在不同网元之间的传递. 数据交换层在功能上对应于传统 OSI 网络体系结构中的物理层、数据链路层、网络层和传输层. 传输通道是实现数据交换的功能性实体, 它通过传输接口与对象感控层的设备实现交互, 其交互的内容实体为感知数据与控制数据. 我们将传输通道分为有线传输通道和无线传输通道. 其中有有线传输通道主要包括双绞线、同轴电缆和光纤等, 是物联网骨干网络的主要传输通道. 无线传输通道主要包括红外、微波、卫星等, 其中 3G/4G、卫星等传输通道为物联网远距离数据交换提供支持, Zigbee、蓝牙、WiFi 等微波传输通道可提供高效的近距离

图 2 物联网体系结构各层的主要实体描述

Figure 2 The class diagram of the entities in each layer of IoT architecture. (a) Object sensing layer; (b) data exchange layer; (c) information integration layer; (d) application service layer

数据交换, 是物联网边缘网络接入的重要通道. 我们通过对象化方法, 对数据交换层的实体进行形式化表示, 其类图如图 2(b) 所示.

3.3 信息整合层

信息整合层将物联网中网元感知到的内容整理和融合成语义层次上的信息, 为应用服务层的设计者屏蔽下层网络的细节. 信息整合层在功能上涵盖了 OSI 参考模型中的表示层和会话层, 但其内容更广泛、功能更强. 作为信息整合层的功能实体, 信息处理器通常需具备较强的计算能力和存储能力, 计算资源和存储资源是其重要的两个属性. 信息处理器的主要功能包括感知数据的整理、信息融合计算、信息查询, 以及信息的隐私保护等. 其中, 数据整理主要解决感知数据的异常、错误、缺失和不一致等问题; 信息融合主要通过对多源感知数据进行关联分析和信息挖掘, 针对物联网感知数据的冗余互补性、动态时序特征和网络上下文, 对多源、多模态和异构感知信息进行多级分阶段融合计算, 以满足不同应用服务的需求. 我们根据信息的时间特性将其分为离散信息与连续信息. 离散信息包括文本、图形、图像等静态信息, 连续信息包括音频、视频等连续媒体信息. 我们将信息整合层关注的主要实体进行形式化表示, 其类图如图 2(c) 所示.

3.4 应用服务层

应用服务层利用信息整合层提供的语义信息, 根据用户对信息的具体需求, 设计并实现不同种类

图 3 以信息为中心的物联网细腰结构

Figure 3 Information-centric internetworking as the narrow waist of IoT architecture

的服务. 应用服务层与信息整合层之间通过规范性接口实现互操作. 应用服务层的主要功能性实体是应用服务器, 它通过标识与位置实现对服务的发布、授权和管理等功能. 服务包括闭环控制服务和开环信息服务两个大类, 其中控制服务通过对指令或任务信息的表达, 实现对象感控层中控制设备的行为执行, 进而控制物理空间中的目标对象, 实现这些服务的系统称为 CPS 系统. 信息服务包括信息的检索、发布、呈现等. 我们对应用服务层的实体进行形式化表示, 其类图如图 2(d) 所示.

通过对各层次实体的对象化设计, 我们刻画了物联网体系结构各层次内以及各层次间的实体关系. 一方面, 该体系结构模型体现了感控、交换、理解和服务的物联网功能层次, 遵从网络分层原理, 便于与现有的各种网络兼容和复用. 另一方面, 该模型体现了实体功能对象化特性, 便于对各层的实体进行对象化封装, 以便更好地支持面向对象的功能实体形式化设计, 通过 API 的方式更好地开放网络资源与能力, 实现基于模块化的系统开发.

4 强弱网元共存的物联网互连模型

在上述模型的基础上, 我们借鉴未来互联网的研究思路, 采用以信息为中心的思想, 对物联网核心的互连问题进行了研究, 如图 3 所示. 物联网与传统网络之间的重要差别之一就是存在大量的弱网元. 我们针对物联网强弱网元共存的环境, 设计了物联网互连模型与互连机制.

4.1 以信息为中心的互连模型

以信息为中心互连的基本理念是网元与网元之间不建立直接的传输连接, 而通过网元对信息需求的表达以及对网络需求的满足, 来实现信息的交换与共享. 这种理念下, 网元与网络之间通过兴趣进行互连.

在以信息为中心的互连模型中, 存在两类结构化协议包: 兴趣包和数据包. 兴趣包由 5 个部分组成: 1) 兴趣标识, 用于网元对接收到的兴趣包进行准确地理解, 通常情况下使用所需信息的名称; 2) 随机数标记, 用于区分一个互连过程中不同表达者的相同兴趣, 以避免兴趣包在网元之间出现循环表达的现象; 3) 兴趣时效, 用于标记兴趣表达的有效时间上限; 4) 表达对象偏好, 用于记录兴趣包转发的网元倾向和限制, 便于兴趣的满足; 5) 附加信息, 用于携带需求信息生成的必要输入等附加信息. 兴趣包

图 4 互连模型中的数据包格式

Figure 4 Packet structure in information-centric internetworking model

图 5 以信息为中心的互连过程

Figure 5 The process of information-centric internetworking

的结构如图 4(a) 所示. 数据包由五部分组成: 1) 信息标识, 用于标识数据包所满足的兴趣, 通常与对应的兴趣标识一致; 2) 安全属性, 用于信息安全性的验证; 3) 信息属性, 包括信息的生成网元、生成时间等属性状态; 4) 信息时效, 用于标记信息沿途缓存的建议时限; 5) 信息内容, 即满足兴趣的信息本身. 数据包的结构如图 4(b) 所示.

假设某网元 A 将某一兴趣以兴趣包表达给网络. 网络中与之相连的网元 C 收到该兴趣包后, 根据该兴趣包的结构进行解析, 并查询自己是否拥有或可以生成满足此兴趣的信息. 若网元 C 拥有或可生成该信息, 则将其以数据包的形式返回给网元 A, 以完成满足过程. 若网元 C 没有或无法生成满足信息, 则将网元 A 记录为该待满足兴趣的表达者, 然后将自身作为该兴趣的新的需求者向除网元 A 之外的网络进行再次表达. 在网元 C 等待网络满足的过程中, 若再次收到网元 B 表达同一兴趣的兴趣包, 则将网元 B 记录在待满足兴趣的列表中, 并继续等待网络的满足. 有些兴趣经过一定的时间后会变弱消失, 若网元 C 的兴趣超过存在时限却无法得到网络的满足, 则网元 C 撤销等待, 并通知网元 A(和 B) 兴趣无法得到满足. 若网元 C 的兴趣在消失前通过网络返回的数据包得到满足, 则网元 C 将信息以副本的形式存储于本地, 并将数据包返回给网元 A(和 B) 以完成兴趣的满足过程. 为避免兴趣在一定范围内出现循环表达而导致无法满足, 每个需求数据包会在其结构中添加一个随机数标记. 该互连过程如图 5 所示.

物联网网元具有 3 类功能要求: 信息的存储或生成、兴趣表达者和存在时限等信息的记录、收到兴趣的转发. 相应地, 物联网网元具有 3 部分基本结构: 信息库 (information store)、待满足兴趣列表 (pending interest table) 和兴趣转发对象列表 (forwarding information base). 信息库是每个物联网网

图 6 物联网网元功能模型
Figure 6 The function model of network element in IoT

元的信息源, 这里的信息包括长期存储信息、缓存信息以及即时生成信息. 已有信息的存储仓库和生成信息的应用程序都包括在信息库中. 待满足兴趣列表用于记录接收到兴趣的表达者和存在时限等状态, 使得满足兴趣的信息通过内部服务或外部网络获得后能够准确地返回给兴趣的表达者, 以完成互连过程. 兴趣转发对象列表的功能类似于以主机为中心的互连模型中的转发信息库, 它将与兴趣包中的表达对象偏好共同决定兴趣转发的对象. 网元功能模型如图 6 所示.

相对于以主机为中心的互连模型, 该模型具有更高的可扩展性和移动性支持, 对物联网网元的大规模性和动态性等特点具有更好的适应性. 本文根据网元自身能力与其功能角色之间的匹配关系, 将物联网网元分为强网元和弱网元. 强网元是指自身能力足以完成与其功能角色相对应的网络任务的物联网网元. 在以信息为中心的网络中, 一般情况下, 强网元与强网元之间的互连遵循上述的互连机制. 弱网元是指自身能力弱于其功能角色要求, 需借助其它网元完成相应的网络任务的网元. 物联网网元的典型能力包括能量、存储、计算、通信等.

4.2 基于能力映射与任务迁移的弱网元与强网元互连机制

本文针对弱网元与强网元之间的互连, 提出了一种基于能力映射与任务迁移的互连机制. 利用该机制进行互连的实现过程包括 4 个步骤:

- 1) 弱网元发出的寻求强网元服务的兴趣包. 物联网边缘网络中的网络资源和能力相对受限, 因此物联网网元要从本地的边缘网络获得信息的满足是相对困难的. 一个直观的解决方法是向最近的强网元寻求帮助. 强网元间的互连模型中, 网元对兴趣的表达是直接针对信息本身的. 然而, 我们提出的互连机制的第一步就是弱网元表达指向强网元所提供的服务. 弱网元生成相应的兴趣包并将其表达给网络. 兴趣包以强网元提供的服务为标识, 它将信息标识作为兴趣包的附加信息携带. 强网元可以提供各种针对弱网元的服务, 如存储服务、表达服务、计算服务等. 该互连过程首先是边缘网络的弱网元发送强网元的兴趣数据包, 如图 7 中的①所示.
- 2) 强网元表达的兴趣包. 当强网元收到该兴趣包后, 将其表达给本地的提供该服务的应用程序.

图 7 弱网元与强网元互连机制

Figure 7 Internetworking model between strong and weak network elements

该应用程序解析兴趣包并获得携带于数据包中的附加信息中的信息标识. 然后, 应用程序生成另一个以需求信息为标识的兴趣包. 强网元将兴趣包通过对内表达给本地的存储或服务模块, 或者对外表达给骨干网络或边缘网络. 这一过程如图 7 中②所示.

3) 满足强网元兴趣的数据包. 当拥有或可生成满足其兴趣的信息的网元收到强网元表达的兴趣包后, 它将满足兴趣的数据包返回给强网元. 数据包将沿着兴趣包的来路返回, 如图 7 中③所示. 这一步中的数据与步骤 2) 中的兴趣包是一对完整的兴趣表达与满足.

4) 数据包对弱网元兴趣的满足. 当强网元收到数据包后, 相应的应用程序将生成另一个数据包以满足步骤 1) 中弱网元所表达的兴趣, 并将其沿原路返回给弱网元, 该过程如图 7 中④所示.

该机制相比于强网元与强网元之间的互连模型具有以下特点:

- 弱网元兴趣的满足依赖于强网元. 当弱网元自身无法完成的网络任务时, 它利用该机制, 发起通信并请求强网元的计算或存储等能力, 将信息的提供与获取任务迁移到强网元.
- 互连过程由弱网元发起. 在以信息为中心的互连模型中, 互连过程均由信息的需求者发起. 然而, 在该机制中, 互连过程均有弱网元发起, 无论弱网元是作为数据的生成者还是服务的使用者.
- 互连过程通过两个兴趣的表达与满足过程以嵌套的形式实现. 步骤 1) 中的兴趣包与步骤 4) 中的数据包, 步骤 2) 中的兴趣包与步骤 3) 中的数据包分别构成一个完整的兴趣表达与满足过程. 由于该机制的嵌套形式, 前者的兴趣包的生存时限要长于后者的兴趣包的生存时限. 生存时限在兴趣包中标记, 并在待满足兴趣列表中记录.

下面, 我们以弱存储能力网元和弱计算能力网元为例对该机制进行描述.

在物联网的边缘网络中存在着大量的存储能力与感知能力不匹配的弱存储能力网元. 弱存储能力网元的互连过程包括 4 个步骤: 1) 针对弱网元的互连中, 互连过程均由弱网元发起. 弱存储网元首先以寻求存储服务作为标识生成兴趣包, 并将欲存储的信息标识记录于兴趣包的附加信息结构中. 存储服务的提供通常会由强存储网元发布在一定范围的网络中, 因此该兴趣包最有可能被最优可达的强存储网元收到; 2) 当某个提供存储服务的强存储网元收到上一步中的兴趣包后, 它将该兴趣记录于自己的待满足兴趣列表中, 并根据兴趣转发对象类列表将该兴趣包表达给本地的存储应用程序. 存储应用程序解析兴趣包并提取出欲存储的信息标识, 随后生成另一个以寻求存储信息为标识的兴趣包, 并通过强存储网元沿前一个兴趣包的来路表达给弱存储能力网元. 这个过程中, 强存储网元并不知道是哪个网元寻求存储服务, 因此, 该兴趣包的表达路径是通过兴趣包中的表达对象偏好来实现的; 3) 当弱存储能力网元收到强存储网元表达的兴趣包后, 它将存储信息以数据包的形式沿路径满足给强存储网

图 8 弱网元的互连机制

Figure 8 Internetworking scheme for network elements with weak capabilities

元; 4) 当强存储网元收到满足兴趣的数据包后, 本地的应用程序将数据存储在强存储网元中. 若该感知数据有发布的需求, 则强存储网元将其标识或前缀发布在一定范围的网络中, 以便于需要该数据的网元对兴趣的高效表达. 然后, 存储应用程序生成一个数据包作为步骤 1 中寻求服务兴趣的满足. 强存储网元将该兴趣从待满足兴趣列表中移除, 并将数据包返回给弱存储网元. 最后, 弱存储网元收到数据包后, 将感知数据丢弃以节省存储资源.

物联网边缘网络中的网元存在着计算能力与应用需求不匹配的情况. 当弱计算能力网元位于边缘网络且计算需求很难在局部范围获得满足时, 无方向性的兴趣表达往往既浪费网络资源又无法得到有效的满足. 针对弱计算能力网元的互连过程包括 4 个步骤: 1) 位于强网元可以更高效地获得兴趣的满足, 它们在满足自身兴趣的同时, 也可以通过提供表达服务帮助其它网元实现兴趣的满足. 当位于边缘网络的弱计算能力网元需求一个计算服务时, 它以寻求表达服务的兴趣为标识生成兴趣包, 并将该计算服务及其所需的输入数据记录于兴趣包的附加信息结构中, 然后将其表达给网络; 2) 当提供表达服务的网元收到兴趣包后, 它首先将该兴趣记录在自己的待满足兴趣列表中, 并根据兴趣转发对象列表将兴趣包表达给本地的表达应用程序. 表达应用程序解析需求数据包并从附加信息结构中提取出计算服务标识及其所需的输入数据. 然后, 该应用程序生成另一个以计算服务为兴趣标识的兴趣包, 并通过提供表达服务的强网元对内表达给本地其它应用程序或对外表达给网络; 3) 如果本地的应用程序能够满足弱网元的需求, 则计算结果以数据包的形式返回给提供表达服务的强网元. 否则, 包含计算结果的数据包将从网络返回给该强网元以完成互连过程; 4) 通过数据包获得满足的强网元进一步将数据包返回给需求计算服务的弱计算能力网元, 并在自身的待满足兴趣列表中移除该兴趣.

弱网元的互连过程如图 8 所示.

5 原型系统与验证

我们构建了一套物联网体系结构验证平台. 该系统验证平台采用了本文所提出的 4 层物联网体系结构模型, 并基于对象化的思想进行设计, 图 9(a) 为物联网系统验证平台架构图. 在对象感控层中, 系统包括多种具有不同感知、计算、存储的网元节点, 如个人计算机等强网元和多媒体感知节点、TelosB 传感器节点等弱网元. 在数据交换层中, 我们在异质网元节点上实现了本文提出的以信息为中心的互连模型以及互连机制, 并通过个人计算机实现了与互联网的互通. 在信息整合层中, 我们对异质传感器节点采集的海量感知数据进行高效的存储和处理, 提取感知数据中的有效信息, 对智能的物联网服务提供支持. 在应用服务层中, 我们面向环境监测实现了一个典型的物联网应用.

图9 体系结构及互连模型验证系统

Figure 9 The verification prototype of IoT architecture and internetworking model. (a) Platform; (b) system GUI

在互连模型验证方面, 我们搭建了面向物联网的以信息为中心的互连网络原型系统. 该系统以个人计算机为强网元, 以 TelosB 节点和多媒体感知节点为弱网元. 其中, TelosB 节点采用 TI MSP430 微处理器, 运行 TinyOS 操作系统, 其 MAC 协议采用 IEEE 802.15.4, 其计算能力和存储能力都是较弱的, 在本系统中作为弱网元参与感知与互连. 多媒体感知节点是实验室基于 ARM11 内核处理器 S3C6410 和 Linux 操作系统开发的多功能感知网元, 具有较强的感知能力. 相对于采集到的感知数据, 其存储资源相对受限, 在该验证系统中作为弱网元参与感知与互连. 我们在两类网元平台上均采用以信息为中心的互连模型设计并开发互连程序, 并利用温度、湿度及二氧化碳感知应用, 实验并验证以信息为中心的物联网互连模型. 我们在教学楼内部署 40 个异质网元节点, 对室内二氧化碳信息进行监测. 原型系统的应用界面及网络拓扑如图 9(b) 所示.

我们利用笔记本电脑通过 RS232 串口数据线与一些网元连接, 用于显示其配置信息、状态信息以及通信过程信息等相关结果. 图 10 以两个弱网元和一个强网元为例, 对文中提出的基于能力映射与任务迁移的强弱网元互连机制的通信过程进行了输出. 作为提供存储服务的强网元 C 运行 ccn_StoringService 应用程序, 等待需求该服务的兴趣. 当弱网元 A 采集到二氧化碳数据后, 将其进行标识并缓存于本地. 然后, 弱网元 A 通过 ccn_ExpressStore 命令发出请求存储服务的兴趣包, 该兴趣包以 StoringService 作为标识, 将数据的标识携带于附加信息中. 弱网元 B 收到该兴趣数据包后, 将兴趣的标识和表达者端口记录于自己的待满足兴趣列表中, 并根据转发对象列表¹⁾将兴趣包通过端口转发给强网元 C. 强网元 C 将兴趣标识及表达者端口记录于待满足兴趣列表中, 然后根据兴趣标识将数据包转达给本地的应用程序 ccn_StoringService, 应用程序通过解析兴趣包的附加信息获得欲存储的信息标识, 并生成一个以数据名称作为兴趣标识的兴趣包, 通过强网元 C 的端口表达给弱网元 B. 弱网元 B 记录新的兴趣标识和表达者端口, 将兴趣包表达给弱网元 A. 弱网元 A 收到兴趣包后, 通过采集到的二氧化碳数据以数据包返回给弱网元 B. 弱网元 B 将得到满足的兴趣从待满足兴趣列表中删除, 并将数据包满足给强网元 C. 强网元 C 收到信息数据后, 将其存储于本地, 完成数据的存储过程. 强网元 C 生成一个数据包作为存储服务兴趣包的回应, 通过对弱网元 B 的满足, 进而满足弱网元 A 的

1) 本实验未对转发对象的决策算法进行设计, 采取最简单的洪泛策略.

图 10 互连机制验证的过程实例及简要描述

Figure 10 The example and brief description of the implementation of internetworking scheme

存储服务兴趣. 弱网元 A 将缓存在本地的数据丢弃以节省存储空间, 最终完成整体互连过程. 验证结果表明, 该互连机制可以有效地支持异质网元间的互连.

6 结论和未来工作

我们提出了物联网体系结构的 4 层功能模型并对各层的实体进行对象化封装和形式化描述. 本文借鉴未来互联网研究的理念, 采用以信息为中心的思想设计网络互连模型, 具有更好的可扩展性和移动性, 对物联网网元的大规模性和动态性等特点具有更强的适应性. 本文设计了支持强弱网元共存的物联网互连模型, 针对物联网中广泛存在的弱网元, 提出了基于能力映射与任务迁移的强弱网元互连机制, 通过搭建的原型系统, 对本文提出的互连模型进行了初步的验证.

在体系结构方面, 我们将进一步细化物联网的实现模型, 对各实体的内部外部接口进行规范设计; 在互连机理方面, 我们将研究适合弱网元的数据缓存方法和待满足兴趣列表的简化方法, 以及基于弱网元能量、通信能力的兴趣转发策略; 研究针对物联网中异质网元的移动性、间歇性等特征的互连机制; 对于物联网中安全问题, 开展适合物联网的隐私保护研究. 在系统验证方面, 我们将扩大实验规模, 丰富系统中异质网元的种类和数量, 面向智能楼宇、智能安防等物联网典型应用场景, 搭建不同的原型系统, 对我们的理论方法进行验证并进一步通过性能量化评估与现有模型和方法进行比较分析.

参考文献

- 1 Ma H D. Internet of Things: Objectives and scientific challenges. J Comput Sci Technol, 2011, 26: 919-924
- 2 Farinacci D, Lewis D, Meyer D, et al. The Locator/ID Separation Protocol(LISP). IETF Standard RFC6830. 2013
- 3 Gagliardi J D, Munger T S, Ploesser D P. Content Delivery Network: Application. US Patent, 2709309, 2008-12-12

- 4 Johnson D, Perkins C, Arkko J. Mobility Support in IPv6. NTWG Standard RFC6275. 2004
- 5 Clark D, Braden R, Sollins K, et al. New Arch: Future Generation Internet Architecture. MIT Cambridge Lab For Comput Sci Technical Report ADA426770. 2004
- 6 Elliott C. GENI-global environment for network innovations. In: 33rd IEEE Conference on Local Computer Networks(LCN), Montreal, 2008
- 7 National Science Foundation. NSF NeTS FIND Initiative. <http://www.nets-find.net>
- 8 Seskar I, Nagaraja K, Nelson S, et al. Mobilityfirst future internet architecture project. In: Proceedings of the 7th Asian Internet Engineering Conference. New York: ACM, 2011. 1–3
- 9 Nelson S C, Bhanage G, Raychaudhuri D. GSTAR: generalized storage-aware routing for mobilityfirst in the future mobile internet. In: Proceedings of the 6th International Workshop on MobiArch. New York: ACM, 2011. 19–24
- 10 NEBULA. Future Internet Architecture. <http://nebula.cis.upenn.edu>
- 11 Ahlgren B, Dannewitz C, Imbrenda C, et al. A survey of information-centric networking. IEEE Commun Mag, 2012, 50: 26–36
- 12 Koponen T, Chawla M, Chun B G, et al. A data-oriented (and beyond) network architecture. ACM SIGCOMM Comput Commun Rev, 2007, 37: 181–192
- 13 Dannewitz C, Kutscher D, Ohlman B, et al. Network of information (NetInf)–An information-centric networking architecture. Comput Commun, 2013, 36: 721–735
- 14 Lagutin D, Visala K, Tarkoma S. Publish/Subscribe for Internet: PSIRP Perspective. Future Internet Assembly. 2010. 75–84
- 15 PURSUIT: Publish-Subscribe Internet Technology. <http://www.fp7-pursuit.eu/>
- 16 Future Internet Research Group. Demo Abstract: Service-Oriented Future Internet Architecture(SOFIA). <http://fi.ict.ac.cn/>
- 17 eXpressive Internet Architecture Project. <http://www.cs.cmu.edu/~xia/>
- 18 Han D, Anand A, Dogar F, et al. XIA: Efficient support for evolvable internetworking. In: Proceeding of 9th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation. Berkeley: USENIX Association, 2012
- 19 Choicenet: Network Innovation Through Choice. <https://code.renci.org/gf/project/choicenet/>
- 20 Wolf T, Griffioen J, Calvert K L, et al. Choice as a principle in network architecture. ACM SIGCOMM Comput Commun Review, 2012, 42: 105–106
- 21 Jacobson V, Smetters D K, Thornton J D, et al. Networking named content. In: Proceedings of the 5th Tnternational Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. New York: ACM, 2009. 1–12
- 22 Zhang L, Estrin D, Burke J, et al. Named Data Networking Project. PARC Tech Report NDN-0001. 2010
- 23 Electronics and Telecommunication Research Institute(ETRI)of the Republic of Korea. Requirements for support of USN applications and services in NGN environment. In: Proceedings of the ITU NGN Global Standards Initiative (NGN-GSI)Rapporteur Group Meeting. Geneva, 2007. 11–21
- 24 Vicaire P A, Xie Z, Hoque E, et al. Physicalnet: A generic framework for managing and programming across pervasive computing networks. In: Proceedings of the 16th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS), Los Alamitos: IEEE, 2010. 269–278
- 25 Walewski J W. Initial Architectural Reference Model for IoT. EU FP7 Project, Deliverable Report: D1.2, 2011
- 26 Presser M, Barnaghi P M, Eurich M, et al. The SENSEI project: integrating the physical world with the digital world of the network of the future. IEEE Commun Mag, 2009, 47: 1–4
- 27 Sarma S, Brock D L, Ashton K. The networked physical world: proposals for engineering the next generation of computing, commerce and automatic identification. Auto-ID Center White Paper MIT, 2000. 1–16
- 28 Traub K, Allgair G, Barthel H, et al. The EPCglobal Architecture Framework. EPCglobal Ratified Specification. 2005
- 29 Koshizuka N, Sakamura K. Ubiquitous ID: standards for ubiquitous computing and the Internet of Things. IEEE Pervasive Comput, 2010, 9: 98–101
- 30 ETSI. Machine to Machine Communications(M2M): Functional Architecture. ETSI Technical Specification. 2011
- 31 Pujolle G. An autonomic-oriented architecture for the internet of things. In: Proceedings of the IEEE John Vincent Atanasoff 2006 International Symposium on Modern Computing. Sofia, 2006. 163–168

The research of IoT architecture model and internetworking mechanism

MA HuaDong*, SONG YuNing & YU ShuaiYang

Beijing Key Laboratory of Intelligent Telecommunication Software and Multimedia, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

*E-mail: mhd@bupt.edu.cn

Abstract Networks have greatly changed people's production and life through the information sharing. Internet of Things(IoT) is an extension of the networks to the physical space. By sensing and controlling the physical environment, IoT enhances our ability of understanding and changing the world. This paper proposes the functional model of IoT architecture with four hierarchical levels, including object sensing and controlling layer, data communication layer, information integration layer, service application layer. Then we present the object-oriented description of the architecture model and the main entities of each layer. For the internet working issue, which is the core problem of the IoT architecture, we propose an internetworking model supporting the coexistence of the strong and weak network elements. We present the internet working mechanism between the strong and weak network elements based on the ability mapping and task transfer. We verify our proposed internetworking model and mechanism through the prototype.

Keywords internet of things, architecture, internetworking model, weak network element, prototype

MA HuaDong was born in 1964. He is a professor and director of Beijing Key Lab of Intelligent Telecommunications Software and Multimedia, executive dean of School of Computer Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, China. He received his PhD degree in Computer Science from the Institute of Computing Technology, the Chinese Academy of Science in 1995. His current research

focuses on multimedia system and networking, sensor networks and internet of things. He is a member of CCF, IEEE and ACM.

SONG YuNing was born in 1985. He is currently working toward the Ph.D. degree in Beijing Key Lab of Intelligent Telecommunications Software and Multimedia, Beijing University of Posts and Telecommunications. His research interest covers the fields of Internet of things and information-centric networking.

YU ShuaiYang was born in 1989. He is a Master Degree Candidate of Beijing Key Lab of Intelligent Telecommunication Software and Multimedia. His research area is the Internet of Things and Content Centric Network.