

doi:10.11959/j.issn.2096-3750.2017.00016

## GlobeSen: 以信息为中心的物联网互联架构

陈博, 刘亮, 马华东

(北京邮电大学计算机学院, 北京 100876)

**摘要:** 提出了一个以信息为中心的物联网互联框架——GlobeSen, 实现传感器网络与互联网的高效互联。首先面向无线传感器节点这类弱网元, 结合感知数据的时空特性, 设计了一套以信息为中心传感器网络协议 NDNs, 主要包括感知数据命名方法、基于时空关系的数据匹配方法、路由转发方法和协作式的缓存策略。进而设计了一个运行在网关的协议转换机制 NDNt, 实现 NDNs 和互联网上运行的 NDNx 之间的互通。使用 TelosB 无线传感器节点和 ARM 开发板搭建了一套原型系统, 并在实地环境中进行了部署, 通过一系列实验对上述设计进行了验证。

**关键词:** 物联网; 以信息为中心网络; 互联架构

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

## GlobeSen: an interconnection framework of information-centric IoT

CHEN Bo, LIU Liang, MA Hua-dong

(College of Computers, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Interconnection framework of information-centric IoT: GlobeSen was proposed, which implemented the efficient interconnection of sensor networks and Internet. According to the characteristic of weak network elements, such as wireless sensor nodes, and the spatio-temporal relationship of sensory data, an information-centric network protocol for sensor networks NDNs was designed. Then, a protocol translation mechanism in the gateway was designed to interconnect NDNs and NDNx that running in Internet. A prototype by using the TelosB wireless sensor node and ARM board was implemented, and the proposed design by deploying the prototype in the environment was evaluated.

**Keywords:** IoT, information-centric network, interconnection framework

### 1 引言

物联网 (IoT, Internet of Things) 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<sup>[1,2]</sup>。作为物联网的重要基础, 以传感器网络为代表的感知技术是连接物理世界与信息世界的关键。然而, 与传统路由器、服务器、PC 机等互联网中常见网元相比, 传感器节点由于计算、存

储、通信、能量等的受限性, 使传感器网络通过互联网实现高效互联面临挑战, 这也成为物联网体系结构研究中的一个重要问题<sup>[3]</sup>。

由于传感器网络资源受限, 互联网中所使用的 IP 协议栈不能直接部署到无线传感器节点中去。传统实现传感器网络与互联网互联主要有 2 种方式。一是应用层互联, 即通过部署应用层网关进行复杂的协议转换和应用层语义信息提取, 完成传感器网络与互联网的数据交换。二是基于 IP 的网络

收稿日期: 2017-06-15; 修回日期: 2017-0-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61332005, No.61632008); 国家创新研究群体科学基金资助项目 (No.64421061); 北京市领军人才培养基金资助项目 (No.ljrc201502)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61332005, No.61632008), The Funds for Creative Research Groups of China (No.64421061), Beijing Outstanding Academic Leaders Plan (No.ljrc201502)

层互联,即在传感器网络中使用 6LoWPAN 等轻量级 IP 协议<sup>[4,5]</sup>,进而通过协议转换完成网络层互联。但是,以上 2 种方式都存在着不同的缺陷。第一种应用层互联方式降低了通信效率与可扩展性,提高了通信复杂度;第二种方式则依旧采用端到端的通信模型,将 IP 对多播、移动性、安全性等支持差的固疾带入到物联网之中。特别是,传感器网络被广泛认为是一个以数据为中心的网络,需要进行大量的数据分发和共享,传统基于 IP 的端到端通信模型具有较大局限性。

以信息为中心网络(ICN)是未来网络体系结构研究的前沿热点,它将互联“细腰”从以 IP/ID 地址为中心转变为以命名数据/服务为中心,提高数据分发的效率<sup>[6]</sup>。此外,以信息为中心网络还具有接收端驱动、基于内容的安全策略以及网内缓存等特点。这些特点使以信息为中心网络能够很好地适用于物联网场景。本文利用以信息为中心思想,设计了 GlobeSen 这一物联网互联架构,实现传感器网络与互联网的高效互联,如图 1 所示。在互联网中,本文采用当前最主流的以信息为中心协议 NDNx<sup>[7]</sup>。用户通过发送兴趣分组(Interest),在网络中去匹配与兴趣分组具有相同的名字数据分组(Data),然后返回给用户。然而,NDNx 主要是面向强网元设计的,无法直接部署到无线传感器节点中,并且在数据命名、路由策略等上面并没有体现传感器网络的特点。因此,本文为传感器网络设计了一套轻量级的以信息为中心网络协议——NDNs,包括:主要数据结构(转发信息表 FIB、待定兴趣表 PIT、内容库 CS)、感知数据命名规则、路由策略以及缓存策略。为了实现以信息为中心骨干网和传感器网络的

连接,本文还设计了一套在网关运行的协议转换机制——NDNt。GlobeSen 实现了如下数据交换流程:用户在互联网中发起请求,通过 NDNx 将兴趣分组发送到相应网关;NDNt 进行分组格式转换,再将兴趣分组发送到运行 NDNs 的传感器节点上;节点将兴趣分组转发到目的节点,目的节点产生感知数据后根据待定兴趣表回溯到网关;通过协议转换,该数据分组沿着互联网节点中的待定兴趣表表项返回给用户。本文的主要贡献有以下几点。

1) 不同于传统应用层互联和基于 IP 的网络层互联,本文设计并实现了整套以信息为中心的强弱网元互联架构,为解决传感器网络与互联网的高效互联问题探索了一条途径。

2) 提出了一套基于时空的命名方法和基于时空关系的数据匹配方法。不同于以信息为中心网络中经典的基于 URL 的命名方法和最长前缀匹配方法,本文方法提供了简洁的全球唯一命名空间和简单高效的数据匹配方式,更加适应传感器网络资源受限的网络环境。

3) 基于 TelosB 传感器节点和 ARM 开发板开发了一套原型系统,并在 2 个地方进行了实地应用部署。本文还将源代码放到了 GitHub 上以供更多的研究者下载。

## 2 相关工作

近年来,以信息为中心物联网(ICN-IoT)的研究成为了一个热门话题<sup>[8,9]</sup>。前期的工作主要着眼于如何在物联网环境中使用 ICN 架构。文献[10]提出了支持强弱网元共存的物联网互联模型和基于能力映射与任务迁移的强弱网元互联机制,通过原

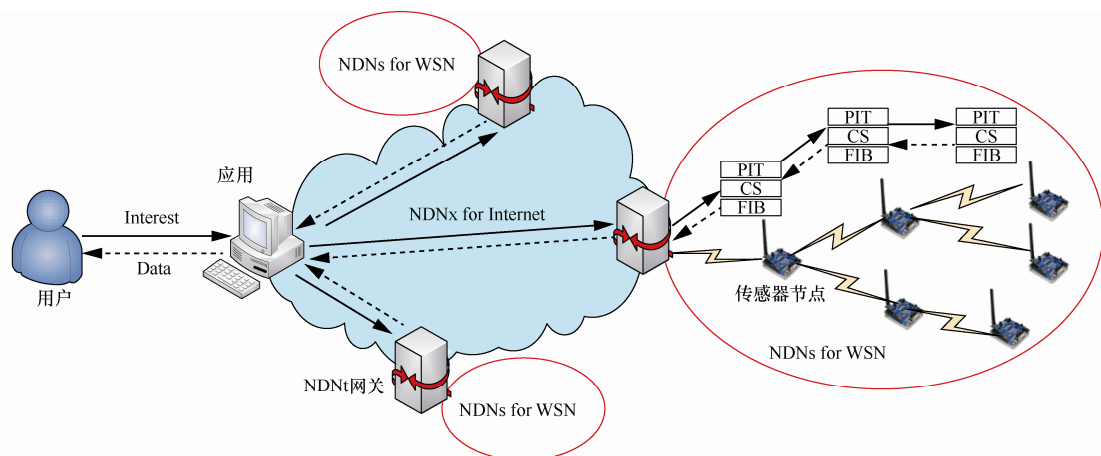


图 1 传感器网络与互联网的以信息为中心互联流程

型系统验证了通过 CCN 实现物联网互联的可行性与高效性；文献[11]将 CCN 部署到了为传感器网络设计的 Contiki 操作系统中，并在 SensLAB 实验床上进行了验证；文献[12]开发了一个轻量级的 CCN 协议并将其部署到了 RIOT 系统中，通过在实地进行部署，表明了 ICN 在能源消耗和内存占用上要优于 6LoWPAN/IPv6/ROL 等。

当前研究的重点则是如何根据物联网本身的特性来设计相应的 ICN 架构。NDN 开发团队在文献[13]中介绍了 NDN 在作为物联网网络架构解决方案时需要考虑的设备管理、能量效率、顽健性、命名方法、安全策略、设备发现、缓存算法、转发路由等问题。针对这些问题，近年来也涌现出如下一些工作。

1) 设备发现的研究思路主要有 2 种：一种是通过具有语义信息的兴趣分组分发探索来发现设备，如文献[9, 14, 15]中使用的方法。另一种是设备注册的方法，即设备本身在连入系统时系统记录在某一解析服务器，其他设备发现该设备则通过该服务器进行查找和解析，如文献[16]中介绍的 MobilityFirst 的 GNRS（全球命名解析服务器）方法和文献[17]中使用的 DONA（面向数据网络架构）的方法。

2) 数据命名方法主要有 2 种：层次化的命名策略和扁平化的命名策略。层次化的命名策略得到了较广泛的采用<sup>[9, 18-20]</sup>，如文献[18]中采用的/ucla.edu/bms/building/melnitz/studio/1/data/panel/J/voltage/timestamp 形式，是根据数据内容和应用来命名的。层次化的命名可以是变长的，但是变长的名字会导致名字检索速度变慢。

3) 基于名字的路由是 ICN 路由的基本方法。在物联网环境中，基于名字的路由同样具有许多优点，如顽健性强<sup>[14]</sup>、自适应转发和名字前缀聚合更适合大规模设备网络部署等<sup>[9]</sup>。根据物联网特点而设计的转发策略更能够体现出基于名字路由和自适应转发的优势。文献[21]提出了基于上下文的转发策略，能够有效提高转发效率同时降低能源消耗。同时，文献[22]证明在稀疏的大网络中，GPSR 能够有效节省 CPU 步数以及通信总量，在 IoT 环境中比普通 ICN 转发更具有优势。但与此同时，基于名字的路由方法也存在问题：随着设备的增多，FIB 表也在不断增大，查找难度也在不断增大。

4) 网内缓存是以信息为中心网络的一大特点，

缓存算法会极大地影响网络的整体性能<sup>[9]</sup>，缓存的位置可以是网络中的路由器或者是资源受限的设备。由于物联网环境具有网元能力不一，异构性强。处处缓存的算法不适用于以信息为中心物联网网络<sup>[23]</sup>。同时，缓存的意义也有所不同，物联网环境中的内容具有时效性，对数据新鲜度的要求较高<sup>[24]</sup>。所以，缓存的目的不仅是延长缓存驻留时间，还需要加快内容分发速度。优异的缓存算法应该同时考虑到设备本身性能以及数据流行度等因素。

5) 以信息为中心物联网的安全问题分为 2 层，一是整体网络的安全机制，二是具体的数据加密解密方法。以信息为中心的安全机制是基于授权认证的方法。物联网的应用需要从被授权认证的用户处获得查询信息。同时，授权认证信息只能携带在数据分组中，所以是无法在兴趣分组中获得认证信息的。但是，由于公钥私钥加密机制的复杂性，难以部署在物联网设备中。其次，当前的以信息为中心也只是实现了在数据分组之上的安全机制，同时也无法主动获得认证。为此，文献[18, 19]中提出了将安全信息嵌入到请求分组中的方法。但这种方法增加了安全架构的复杂度，同时也增加了名字的长度。这同样会造成在处理能力低或者低电量节点的部署困难。在具体的数据加密方法方面，较好的解决方案是对称加密机制<sup>[19]</sup>，能在复杂度和节约资源方面获得较好的平衡。但是需要预先发布 key。文献[25]则提出了使用 ABE（基于属性加密）来数据加密，更好地适应了资源受限设备的容量小、处理慢、电量少等特点。在安全协议方面，文献[26]提出了物联网环境中的网络授权以及验证协议 OnboardICNg，与传统的 EPA-PANA 相比，在通信量和能量消耗方面具有较大优势。

总的来说，以 NDN 为代表的以信息为中心网络架构在解决物联网问题时，根据物联网的特性提出了一系列的解决方案。这些解决方案证明了以信息为中心网络架构具有解决物联网中的数据分发、互联互通、安全性和顽健性等方面问题的巨大潜力。

### 3 NDNs: 以信息为中心传感器网络协议

本节将从命名方法、转发与路由策略、缓存策略等几个方面详细描述以信息为中心传感器网络协议 NDNs 的设计细节。

#### 3.1 命名方法

在 NDN 网络中，任何节点和数据都具有自己

的名字,用以进行设备发现、路由寻找和数据匹配等。传统的 NDN 命名方式是基于 URL 的命名方式,如当用户想请求学校第三教学楼一号教室 12:00 时的温度,构造的兴趣分组名字格式则为 /campus/building3/room1/12:00/temperature。兴趣分组在发送到传感器网络中的节点后,会通过最长前缀匹配的方式获取数据,然后返回给用户。这种基于 URL 的命名方式和最长前缀的数据匹配方法存在 2 个问题: 1) 无线传感器节点只有极有限的存储空间和较差的计算能力,很难存储这些变长的字符串和进行字符串最长前缀匹配计算; 2) URL 中的字符串语义信息无法被无线传感器节点所识别。因为一个无线传感器能够知道它所在的经纬度地理位置,但不知道基于用户逻辑所表达的诸如第三教学楼等逻辑地理位置。为此,本文在 NDNs 中采用基于经纬度地理位置的节点命名方法和基于时空信息的数据匹配方法。对于传感器网络中的传感器节点,使用其地理位置进行命名: /wsn/position。字段 wsn 表示所处网络为传感器网络; 字段 position 表示节点所在地理位置,通常是一个节点的经纬度坐标,如 (116.364 059, 39.966 653)。由于传感器节点的地理位置具有唯一性,所以通过使用经纬度代表的地理位置对固定节点进行命名,能够得到全球唯一的具有位置语义的节点名字和数据名字。图 2 描述了兴趣分组和数据分组的名字格式。兴趣分组的名字结构如下: /wsn/interested-area/interested-period/data-type。字段 interested-area 通过一个矩形区域的左下角和右上角的经纬度坐标来表示,表示用户的感兴趣区域。字段 interested-period 通过 2 个

Unix 时间戳来表示用户的感兴趣周期, 字段 data-type 表示用户的数据类型。数据分组的名字结构如下: /wsn/sensed-position/sensed-time/data-type。字段 sensed-position 表示感知数据的感知位置, 字段 sensed-time 表示感知数据的感知时间, 字段 data-type 表示感知数据类型。当用户请求一个地理区域和时间周期内的数据的时候, 只有当数据同时在感兴趣地理区域和感兴趣时间周期内, 且数据类型一致时, 才会匹配相应的数据分组, 即

$$\text{Data.sensedPosition} \in \text{Interest.interestedArea}$$

$$\text{Data.sensedTime} \in \text{Interest.interestedPeriod}$$

$$\text{Data.dataType} = \text{Interest.dataType}$$

称这种方法为时空关系匹配。图 3 描述了时空关系匹配的原理。基于时空关系的匹配方法只需要进行简单比较计算, 较之最长前缀匹配大大减少了计算量, 同时由于时空关系匹配是对一定时空范围进行匹配, 可以显著降低网内的通信量, 这也间接降低了能源消耗。

### 3.2 转发与路由策略

NDNs 中的转发策略同样遵从 NDN 中根据转发信息表进行转发的策略。首先需要建立在每个传感器节点的转发信息表。图 4(a)描述了转发信息表的建立过程的一个例子。其计算过程如下: 传感器节点收集其子节点的位置信息, 通过计算包含其自身以及其子节点在内的占有的最大矩形区域, 从而形成自己的服务区域。这个服务区域就代表了一个传感器节点所能到达的感知区域, 对于 3 号节点来说就是 3 号节点的经度和 6 号节点的纬度所代表的左下角的点和 5 号节点的经纬度所代表的右上角的点所组成的区域, 即矩

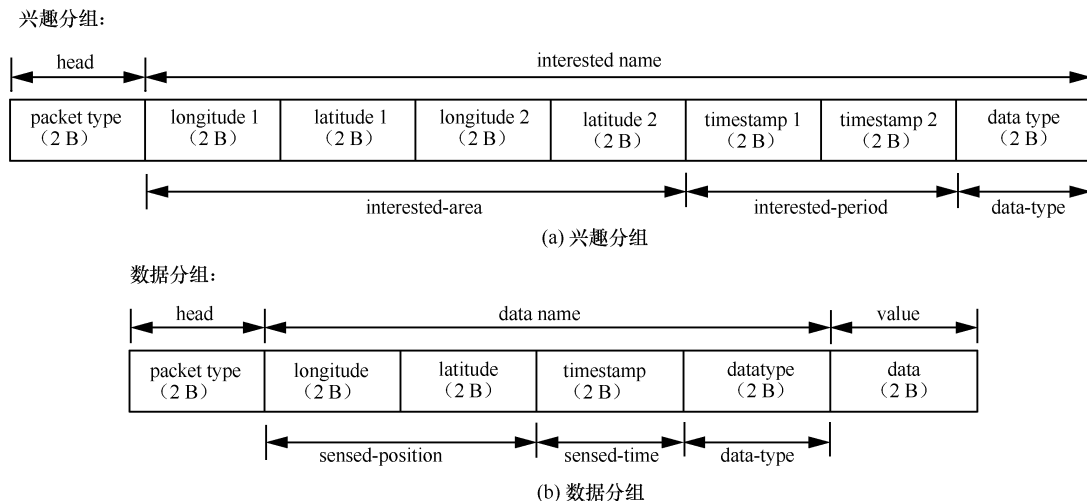


图 2 兴趣分组和数据分组结构

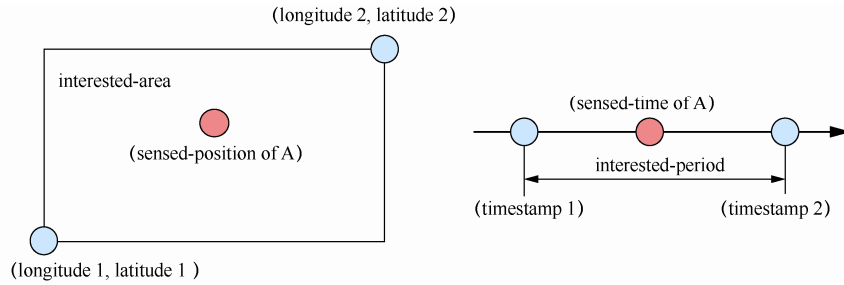
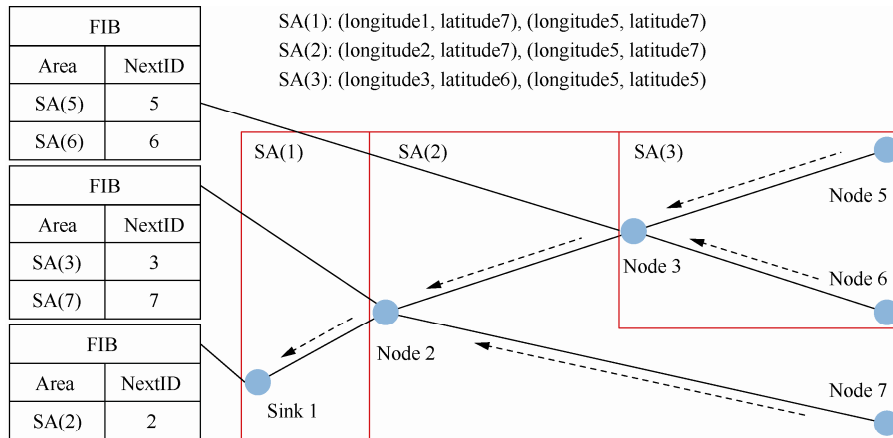
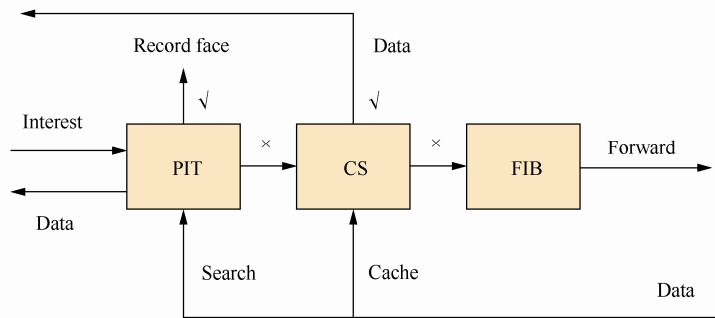


图 3 时空关系匹配



(a) 待定兴趣表建立



(b) 兴趣分组和数据分组的转发处理

图 4 转发策略

形 SA(3)。对每一个节点都进行这样的服务区域计算操作，同时将这个服务区域信息上报给父节点，则父节点就能根据子节点上交的子服务区域信息建立相应的转发信息表。图 4(a)给出了一个待定兴趣表建立的例子。算法 1 给出了建立转发信息表的具体算法。转发信息表的建立是在网络初始化时完成的，在完成了转发信息表初始化后，对于到达节点的兴趣分组，节点就会进行查询待定信息表、内容库等操作。算法 2 给出了处理和转发兴趣分组的具体算法，图 4(b)给出了兴趣分组和数据分组在节点中的处理流程。从算法 2 中可以看到，不同于骨干网中的最长前缀匹配的查询方法，NDNs 的转发表的查询是一个交集

查询操作，减少了转发信息表的存储空间消耗和查询操作所需要的时间耗费。同时，通过对经过节点的数据分组进行缓存，可以降低平均跳数，从而降低请求时延。

**算法 1 FIB 表构造**

输入 子节点服务区域集合  $SA: \{SA_1, SA_2, \dots\}$

输出 节点 FIB

**for each**  $SA_n$  **in**  $SA$  **do**

    在 FIB 中插入子节点的  $SA_n$  和  $ID$ ;

**end for**

$minLng$ =节点左下点经度;

$minLat$ =节点左下点纬度;

```

maxLng=节点右上点经度;
maxLat=节点右上点纬度;
for each SAn in A do
  if SAn的左下点经度 <minLng then
    minLng=SAn的左下点经度;
  if SAn的左下点纬度<minLat then
    minLat=SAn的左下点纬度;
if SAn的右上点经度 >maxLng then
  maxLng=SAn的右上点经度;
if SAn的右上点纬度>maxLat then
  maxLat=SAn的右上点纬度;
end for
SA=(minLng, minLat, maxLng, maxLat);
将 SA 提交给父节点;

```

传感器网络中主要用来收集感知数据, 所以通常使用汇聚树作为其拓扑结构。在本文的路由协议中使用汇聚树协议 (CTP<sup>[27]</sup>) 构造底层网络拓扑。它主要由链路估计器和路由引擎 2 个部分组成。链路估计器是 CTP 中用来估计链路质量和建立节点父子关系的部件。它通过周期性地向其邻居节点广

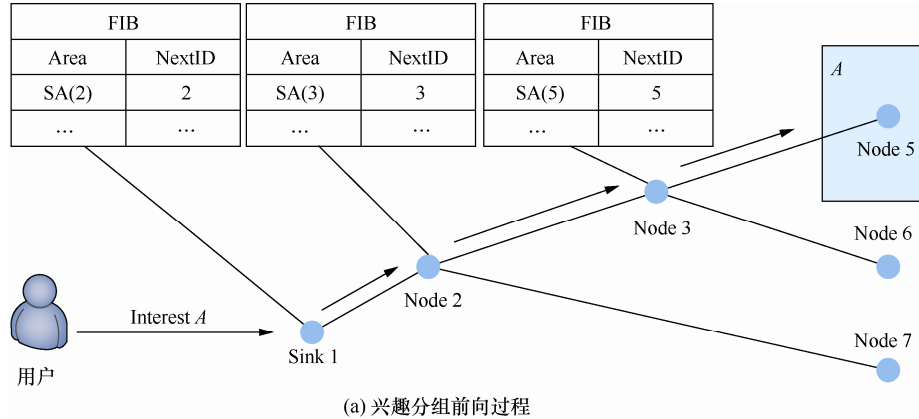
播 LEFP 分组和 Data 分组来计算节点自身与邻居间的链路质量。本文在 Data 分组中加入了节点的经纬度信息来表示节点自身的位置, 这样, 在获取链路质量信息的同时也可以获取节点的位置信息。路由引擎通过链路估计所取得的网络拓扑中来选择下一跳进行兴趣分组转发。图 5 描述了一个路由过程。通过链路估计器建立起网络的底层拓扑, 每个节点对兴趣分组进行第 3.2 节所述的转发操作(图 5(a))。在获取感知数据之后, 感知数据将沿着存储在 PIT 表中的信息返回到汇聚节点(图 5(b))。由于传感器网络的链路的动态变化, 要周期性地链路估计和转发信息表的刷新操作, 对于未获得回应的节点, 应当从转发信息表中删除。

**算法 2 兴趣分组转发**

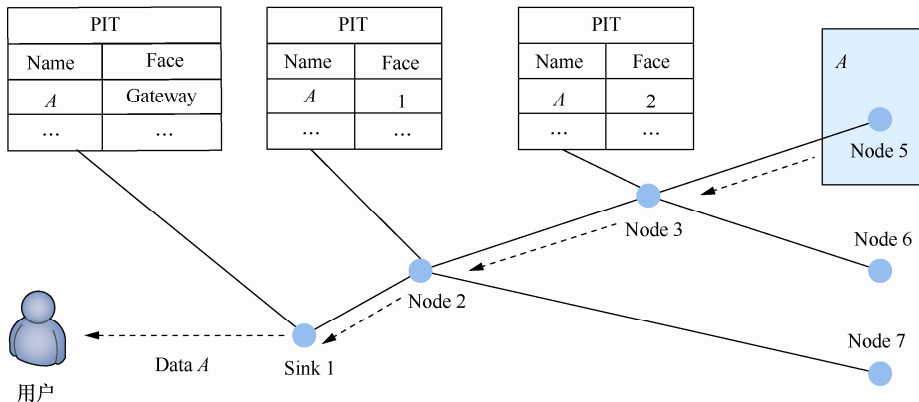
```

输入 兴趣分组 I
输出 I 的转发路径
if I in PIT then
  refresh PIT Item (I); add PIT Face (I.face); break;
else
  add PIT Item (I);

```



(a) 兴趣分组前向过程



(b) 数据分组回溯过程

图 5 路由过程

```

end if
for each  $d$  in CS do
  if  $d.position \in I.interestedArea \ \&\& \ d.time \in$ 
 $I.interestedPeriod \ \&\& \ d.dataType = I.dataType$  then
    forward ( $d, I.face$ ); break;
  end if end for
  if  $nodeItself.position \in I.interestedArea \ \&\& \ no-$ 
 $deItself.time \in I.interestedPeriod$  then
    感知到  $D$ ; forward ( $D, I.face$ ); break;
  end if
  for each  $\{A(sc), c\}$  in FIB do
    if  $I.interestedArea \cap A(sc) \neq \emptyset$  then
      forward ( $I, c$ );
    end if
  end for

```

### 3.3 缓存策略

#### 算法3 缓存空间计算

输入 子节点数  $S_S$ ; 网络节点数  $S_E$ ; 内容数  $N$ ;  
系数  $k_1, k_2$

输出 缓存大小

$$\sum \sigma_{i,j}(v) = S_S; \sigma = S_E;$$

$$B(v) = \frac{\sum \sigma_{i,j}(v)}{\sigma};$$

$$Betw(v) = \frac{B(v)}{\max\{B(l)\}}$$

$$\gamma = \frac{k_1 \cdot Betw(v)}{k_2 \cdot N}$$

$$c = fminbnd(\gamma \cdot (1 - c^{0.2}) + c)$$

$$cacheSize = c \cdot N;$$

以信息为中心网络通过在网内节点缓存数据分组, 能够降低请求的平均跳数, 从而减少请求时延和传输包数。然而, 骨干网中的缓存策略并没有考虑到传感器网络环境所特有的能源受限、存储空间小、链接不稳定等问题。为此, 本文为 NDNs 设计了一套协作式缓存策略。该策略由 3 部分组成: 1) 基于节点介数的缓存空间调整策略; 2) 基于数据替换频率的缓存决策策略; 3) 基于内容价值的缓存替换策略。不同于骨干网中的节点, 无线传感器节点缓存空间极其有限, 而缓存空间大小会影响缓存命中率, 内存消耗等问题。骨干网中的方案是为所有节点划立统一的缓存空间。然而, 传感器网络的网络拓扑和骨干网不同, 传感器网络通常是一个多叉树型网络, 所有的数

据最终都会汇聚到汇聚节点, 所以每个节点承担的任务量是不一样的。于是本文根据节点的介数, 并综合考虑了缓存命中率和能源消耗, 提出了基于节点介数的缓存空间调整策略。节点介数是指经过节点的最短路径数占网内最短路径总数的比率。文献[28]中提出了通过自我网络介数来计算节点介数计算方法。但是该方法需要进行矩阵计算, 需要耗费较大计算量。于是本文根据传感器网络的网络拓扑特点提出了根据子节点数目计算介数的方法。其公式如下

$$C_B(v) = \frac{S_S}{S_E} \quad (1)$$

其中,  $C_B(v)$  表示  $v$  节点介数,  $S_S$  表示  $v$  节点的子节点数目,  $S_E$  表示全网节点数目。因为在树形拓扑中, 通往某一节点子节点的路径是唯一的且必然经过父节点, 通过计算某节点的子节点数目占全网节点数目的比率就可以得出节点介数。节点介数也同时代表着节点的任务量和能源消耗, 介数越大的节点, 其任务量和能源消耗也就越高, 应当分配较大的缓存空间。而介数最低的叶子节点只会缓存自己的数据而不会缓存其他节点的数据, 应当分配较小的缓存空间避免浪费。为了同时兼顾节点的能源消耗和缓存空间消耗, 本文把二者当作优化参数进行了总消耗的最优化, 其公式如下

$$Cost_v = k_1 \cdot Betw(v) \cdot (1 - h(C_v)) + k_2 \cdot C_v \quad (2)$$

其中,  $Cost_v$  代表总消耗,  $Betw(v)$  代表节点介数,  $C_v$  代表缓存空间,  $h(C_v)$  代表缓存空间为  $C_v$  的情况下的理论最佳命中率,  $k_1$  和  $k_2$  是相关系数。对式(3)进行归一化, 得到

$$\delta(c) = \gamma(1 - h(c)) + c \quad (3)$$

可以证明, 当  $\gamma < 5$  时, 即可以得到最小消耗点。算法3给出了节点上计算和分配缓存空间的具体算法。缓存决策策略是指对于一个数据在哪个节点进行缓存的策略。骨干网中的缓存策略是处处缓存, 即只要数据到达节点即缓存。文献[23]中指出, 由于内容缓存空间的有限性、节点通信量和数据流行度的不一致性, 这种处处缓存的策略并非最佳策略, 会导致命中率的降低, 也增加了平均跳数, I/O 频率和能源消耗。为此, 本文提出了基于数据替换频率的缓存决策策略。首先计算替换频率, 其公式如下

$$R_i(v) = \frac{r_i(v)}{m(v)} \quad (4)$$

其中,  $r_i(v)$ 是被请求数据  $C_i$  在节点  $v$  一个时间周期的替换次数,  $m(v)$ 是一个周期内  $v$  节点上发生的总替换次数。对式(5)进行归一化, 得到

$$RepRate_i(v) = \frac{R_i(v)}{\max_{i,j \in C} \{R_j(v)\}}, 0 \leq RepRate_i \leq 1 \quad (5)$$

将  $RepRate_i(v)$ 和节点介数当作参数, 提出一个新的计算某一数据在节点上的缓存概率指标  $BRR$ , 其计算公式如下

$$BRR(v) \propto \frac{Betw(v)}{RepRate_i(v)} \quad (6)$$

这样, 数据将会被缓存在具有较高重要性和较低替换频率的节点, 将缓存数据的任务进行了合理的分配。算法 4 给出了在节点上进行缓存决策的具体算法。

#### 算法 4 缓存决策

输入  $C_i$

输出  $C_i$  的缓存决策

- 1) if  $C_i.replaceFlag == TRUE$  then
- 2)  $r_i = Replacetable[C_i].replacedCount$ ;
- 3)  $m(v) = Replacetable.allReplacedCount$ ;
- 4)  $R_i(v) = \frac{r_i(v)}{m(v)}$ ;
- 5)  $RepRate_i(v) = \frac{R_i(v)}{\max_{i,j \in C} \{R_j(v)\}}$ ;
- 6)  $BRR(v) = normalized\left(\frac{Betw(v)}{RepRate_i(v)}\right)$ ;
- 7)  $randInt = random(0, 1)$ ;
- 8) if  $randInt < BRR(v)$  then
- 9) cache  $C_i$
- 10) else
- 11) return FALSE;
- 12) end if
- 13) else
- 14) cache  $C_i$ ;
- 15) end if

缓存替换算法是指如何替换缓存空间中的数据以最优化缓存命中率的算法。在骨干网中, 经典的方法是所有节点上均使用相同的缓存替换算法, 如都使用 LRU 算法等。这种孤立的替换算法没有体现出节点之间的协作性, 从而使流行度高的内容会在某一时间充满全网, 流行度低的内容无法缓

存。这种缓存的不均匀性在传感器网络中会降低低流行度内容缓存命中率, 增加了请求时延。所以, 根据传感器网络节点所处位置和数据内容的流行度来作为参数, 提出了一个新的概率替换指标  $CV_i(v)$ , 其计算公式如下

$$CV_i(v) = 1 - E^{-|Betw(v) - \rho_i|} \quad (7)$$

其中,  $\rho_i$ 是数据内容  $C_i$  流行度, 在具体的实验过程中其计算公式如下

$$\rho_i = \frac{r_i(T-1)}{R(T-1)} \quad (8)$$

即  $\rho_i$ 代表数据内容  $C_i$  在上一时间周期的请求率。节点使用  $CV_i(v)$ 来对数据进行概率替换。这样, 具有较高介数的节点将会选择较低流行度的内容进行替换, 而介数较低的节点则会选择较高流行度的内容进行替换。这就对缓存任务进行了合理的分配, 延长了节点的生存时间。算法 5 给出了节点中缓存替换的具体算法。

#### 算法 5 缓存替换

输入  $C_i$

输出  $C_i$  的替换决策

- 1) if !CStable.full() then
- 2) CStable.put( $C_i$ )
- 3) else
- 4)  $maxP = 0$ ;  $maxFlag = 0$ ;
- 5) for each in CStable[j] do
- 6)  $\rho_i = CStable[j].touchedCount/allTouchedCount$ ;
- 7)  $P_j = 1 - E^{-|Betw(v) - \rho_i|}$ ;
- 8) if  $P_j > maxP$  then
- 9)  $maxP = P_j$ ;  $maxFlag = j$ ;
- 10) else
- 11) continue;
- 12) end if
- 13) end for
- 14) if Replacetable.contain( $C_{maxFlag}$ ) then
- 15) Replacetable[ $C_{maxFlag}$ ].replacedCount ++;
- 16) else
- 17) Replacetable.put( $C_{maxFlag}$ );
- 18) end if
- 19) CStable.replace( $C_{maxFlag}$ ,  $C_i$ );
- 20) end if

### 4 NDNt: 协议转换机制

GlobeSen 使用 NDNx 作为互联网网络层协议。NDNx 分组格式与传感器网络中的分组格式是不一样的,无法直接进行通信。所以,设计了一个运行在网关的协议转换机制 NDNt,用以实现互联网和传感器网络的互联通信。图 6 描述了 NDNt 的架构。它由 3 部分组成:用于监听所连接感知网络串口的 SPLU 模块;用于进行数据分组格式转换的 CCNB 模块,以及用于返回数据分组和转换兴趣分组的 CCND 模块。对于从骨干网发来的兴趣分组,首先需要在 CCND 模块进行协议转换。CCND 首先提取出来自骨干网兴趣分组的名字,取出其中的感兴趣区域,感兴趣周期和数据类型信息,并将之转换成二进制数字串,然后填入 Data 字段,计算其 CRC 码,再封装成 TinyOS<sup>[29]</sup>中传输的分组格式(如图 7 所示),然后转发到传感器网络中,同时记录发送兴趣分组的入口接口。SPLU 模块会监听和解析收到的传感器网络返回的数据分组,在提取出 Data 字段后,交付给 CCNB 模块。CCNB 模块将 Data 字段中的数据产生位置,数据产生时间和数据类型和数据值提取出来,转换成字符串,打包成骨干网中的数据分组格式,然后交付给 CCND 模块。CCND 模块通过记录的入口接口返回数据分组给发起请求的用户。需要说明的是,协议转换网关也是 NDNx 网络中的一个节点,具有 NDNx 的转发、路由、缓存等功能,如果协议转换网关缓存有了可以匹配兴趣分组的数据,同样会直接返回数据,从而减小网络时延。

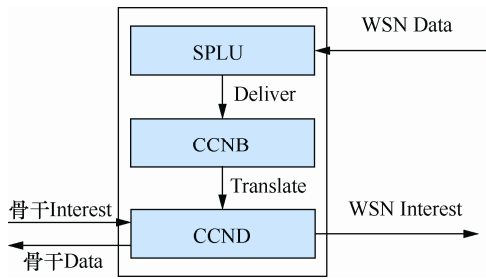


图 6 NDNt 结构

7E	44	26	00	目的地址	源地址	消息长度	ID	Type	Data	CRC	7E
----	----	----	----	------	-----	------	----	------	------	-----	----

图 7 TinyOS 分组格式

## 5 原型系统和实验验证

### 5.1 硬件平台和实验场景

为了验证本文所提出的互联架构的可行性,本

文实现了上述方法的原型系统。本文使用 TelosB 节点当作传感器网络中的节点,使用 ARM 板当作协议转换网关,而用户则使用运行了 NDNx 的个人电脑,图 8 为硬件实体。TelosB 节点主要由有 2 个传感器: SHT10 和 S1087, SHT10 用以感知温度和湿度数据, S1087 用以感知光照数据。但是 TelosB 节点并没有 GPS 模块,所以并不能感知节点自身的位置信息。所以在将 TinyOS 系统拷入节点当中时,同时也将节点部署的经纬度信息也拷入进了节点的只读存储器中。这样,当节点启动时就可以读取到自身的位置信息。协议转换网关则由 3 个部分组成:通信模块、ARM 板和电池包。在野外部署环境时,利用电池包给 ARM 板供电,并通过通信模块提供网络连接服务。如图 9 所示,在 3 个实地进行了网络部署。首先,在校园广场中部署了 20 个节点的实验网络(图 9(a)和图 9(b)),用户可以请求部署区域的温度、湿度、光照等感知信息。其次,本文也在陕西榆林的长城上部署了一个 10 个节点实验网络(图 9(c)和图 9(d)),并通过隧道和北京实验室的 NDN 节点相连。这样,用户可以通过 NDNx 骨干网请求千里之外的榆林长城的感知数据信息。

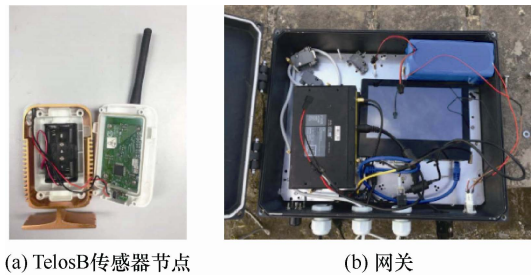


图 8 硬件设备

### 5.2 实验设定及结果分析

为了验证原型系统的可行性和正确性,本文在原型系统上做了一系列实验。实验设定如下:实验过程中共发送 300 个兴趣分组,历时 30 min。兴趣分组发送过程服从到达率  $\lambda=10$  的泊松过程。兴趣分组时间请求流行度:当前  $T_c$  为 60%,前 1 分钟  $T_c-1$  为 25%,前 2 分钟  $T_c-2$  为 15%。请求节点流行度服从 Zipf 定律。即请求  $i$  节点的概率正比于  $\frac{C}{i^\alpha}$ 。其中,  $C=0.18, \alpha=0.8$ 。实验共为 NDNs 设定了 3 组对照组:地理和能量感知路由协议(GEAR<sup>[30]</sup>)、10 s 收集周期的汇聚树协议(CTP10s)和 60 s 周期的汇聚树协议(CTP60s)。此外,为了

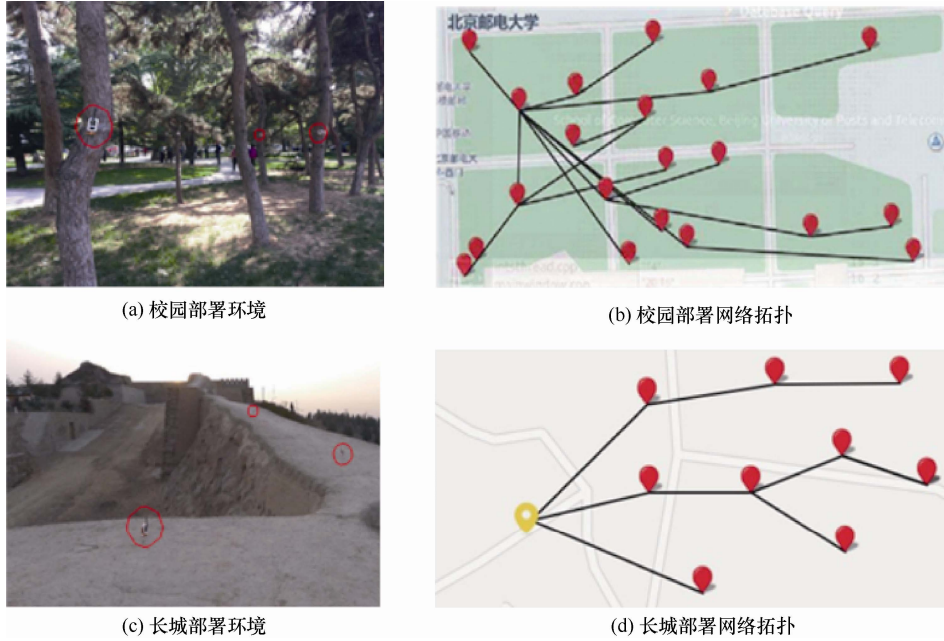


图 9 实验环境

测试本文所提出的协作缓存策略 (BRR-CVR), 实验还在 NDNs 中设定了 4 组对照组: 即依概率缓存决策策略 (LCP)、处处缓存决策策略 (LCE)、先进先出替换策略 (FIFO)、最不频繁使用替换策略 (LFU) 的 4 种组合。其中, 依概率缓存策略的决策概率为 0.5。

本文首先在 NDNs 中比较了缓存策略的命中率。图 10(a)描述了各种缓存策略的平均命中率结果。结果显示, 本文所提出的协作式缓存策略相较于传统方法能够提高缓存命中率 (48.6%)。这是由于协作式缓存策略根据节点角色不同对缓存任务进行了较好的分配, 通过节点之间的协作而不是传统的单节点操作来进行缓存, 从而使整网的缓存效率得到了提高。此外, 也可以看到, LFU 无论是在 LCP 或 LCE

的决策策略情况下, 表现出了相对较好的命中率结果, 分别为 40%、35.7%。而 FIFO 算法则由于未考虑到数据的时间局部性, 在 LCP 和 LCE 策略下表现出的其缓存命中率较差, 分别为 8.5%、35%。

本文比较了 NDNs、GEAR、CTP(60 s)和 CTP(10 s)的节点传输分组数, 请求时延和数据新鲜度。图 10(b)给出了各个协议下 10 个节点的传输分组数盒形图 (图中上界异常点为汇聚节点分组数数据, 均不可排除)。可以看到, NDNs 由于使用的 NDN 的网络架构, 网内具有缓存, 同时采用了高效的时空关系匹配数据的方法, 大大降低了传输分组数, 总分组数大约只占 GEAR 总分组数的 57%、CTP(60 s)总分组数的 52%和 CTP(10 s)总分组数的 14%。图 11(a)给出了各个协议时延的累积分布函数。可以

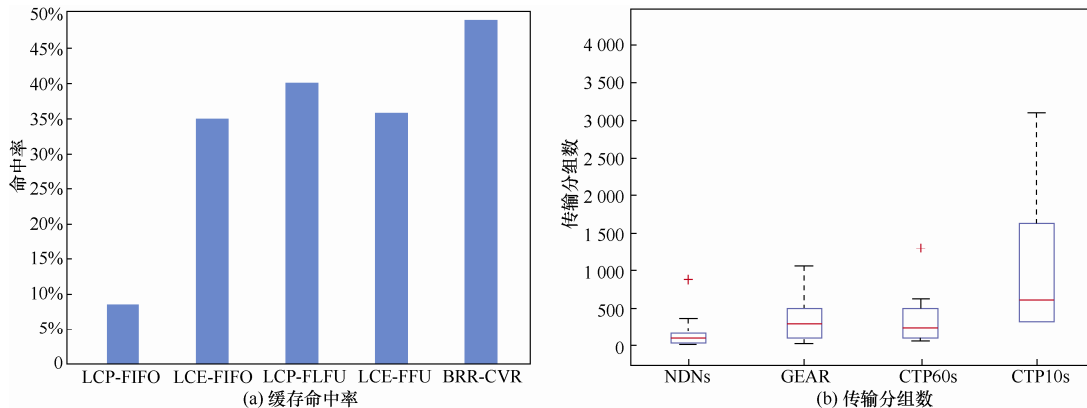


图 10 命中率与传输分组数实验结果

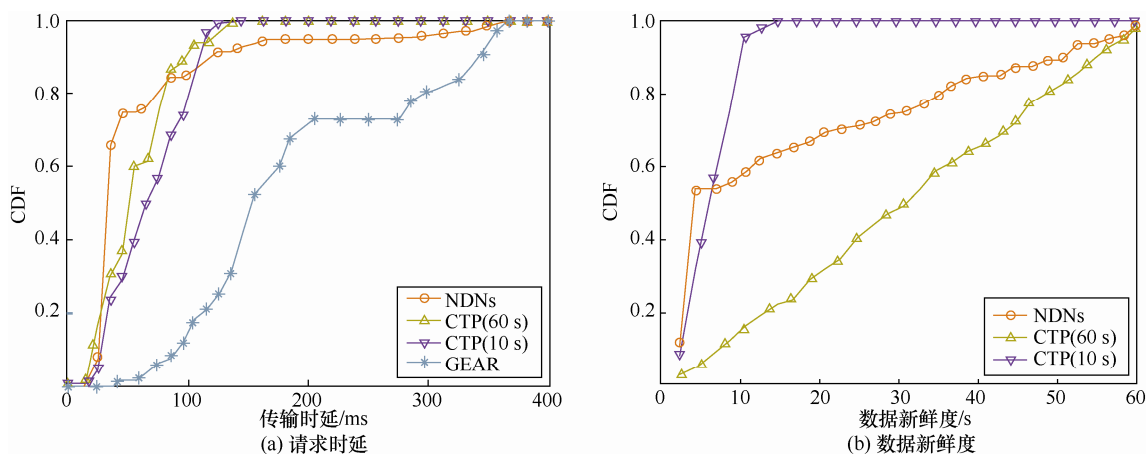


图 11 请求时延与数据新鲜度实验结果

看到，NDNs 中有 74% 的分组时延小于 50 ms，而 CTP(60 s)、CTP(10 s)、GEAR 则分别只有 36%、28%、1%。这主要是因为 NDNs 的网内缓存降低了平均跳数，从而降低了传输时延。最后，本文还比较了数据新鲜度。数据新鲜度是指感兴趣时间和数据产生时间的差值，用以表示数据获取的及时程度。由于 GEAR 只能获取当前时刻的数据，所以本文只比较了 NDNs、CTP(60 s)、CTP(10 s) 三者。图 11(b) 给出了各个协议数据新鲜度的累积分布函数图。从图中可以看到，NDNs 的数据详细的小于 CTP(10 s) 而大于 CTP(60 s)。这是由于 CTP(10 s) 的收集速度较快，而当延长数据收集周期至 60 s 时，就会显著提高数据新鲜度，且其数据新鲜度呈均匀分布。较快的收集周期虽然提供了较小的数据新鲜度，但同样迅速地增加了传输的总分组数。NDNs 的用户也可以通过调节感兴趣周期来控制数据新鲜度。

## 6 结束语

本文提出了一个以信息为中心的连接传感器网络和互联网的物联网互联框架——GlobeSen。该框架主要包括以信息为中心传感器网络协议 NDN 和运行在网关的协议转换机制 NDnt。为了验证本文所提出的互联架构的有效性，实现了一个原型系统并在实地进行了部署。在原型系统上进行的相关实验及结果表明，本文所提出的通过以信息为中心的互联方式能够很好地解决传感器网络和互联网的互联问题，相较于传统的互联方案，在传输分组数、时延和数据新鲜度等方面有较大提升。未来的工作将着眼于如何连接更多种类不同能力的网元，

解决大规模异质网元的数据交换难题。

## 参考文献:

- [1] MA H D. Internet of Things: objectives and scientific challenges[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2011, 26(6): 919-924.
- [2] GUBBIETAL J. Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions[J]. Future Generation Computersystems, 2013, 29(7): 1645-1660.
- [3] MA H D, LIU L, ZHOU A F, et al. On networking of Internet of Things: explorations and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(4):441-452.
- [4] KUSHALNAGAR N, MONTENEGRO G, SCHUMACHER C. IPv6 over low-power wireless personal area networks (6Lowpans): overview, assumptions, problem statement, and goals[R]. Technical Report, 2007.
- [5] 6Lowpan: incorporating IEEE 802.15.4 into the IP architecture[R]. IPSO Alliance, White paper, 2009.
- [6] AHLGREN B. A survey of information-centric networking[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(7): 26-36.
- [7] ZHANG L, AFANASYE A, BURKE J, et al. Named data networking[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(3): 66-73.
- [8] AMADEOETAL M. Information-centric networking for the Internet of Things: challenges and opportunities[J]. IEEE Network, 2016, 30(2): 92-100.
- [9] BACCELLIETAL E. Information centric networking in the IoT: Experiments with NDN in the wild[C]//1st International Conference on Information-Centric Networking. 2014: 77-86.
- [10] SONG Y N, MA H D, LIU L. Content-centric inter networking for resource-constrained devices in the Internet of Things[C]//IEEE International Conference on Communications. 2013: 1742-1747.
- [11] SAADALLAH B, LAHMADI A, FESTOR O. CCNx for Contiki: implementation details[M]//Networking & Internet Architecture, 2012.
- [12] FRANCOIS J CHOLE Z T, ENGEL T. CCN traffic optimization for

- IoT[J]. In Network of the Future(NOF), 2013: 1-5.
- [13] SHANG W T, ZHANG L, BANNIS A, et al. Named data networking of things[C]//2016 IEEE First International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI), 2016: 117-128.
- [14] AMADEO M, CAMPOLO C, ANTONIO I, et al. Named data networking for IoT: anarchitectural perspective[C]// European Conference on Networks and Communications. 2014: 1-5.
- [15] WESTPHAL C, MATHIEU B, AMIN O. Using CCN for discovery of missing physical items[C]//2nd International Conference on Information-Centric Networking. 2015: 213-214.
- [16] LI S G, ZHANG Y Y, RAYCHAUDHURI D, et al. A comparative study of mobility first and ndnbasedi cn-iot architectures[C]// 10th International Conference on Heterogeneous Networking for Quality. 2014: 158-163.
- [17] VASILAKOS X, KATSAROS K, XYLOMENOS G. Cloud computing for global name-resolution in information-centric networks[J]. Network Cloud Computing and Applications. 2012: 88-94.
- [18] SHANG W, DING Q H, MARIANANTONI A, et al. Securing building management systems using named data networking[J]. IEEE Network, 2014, 28(3): 50-56.
- [19] BURKE J, GASTI P, NATHAN N, et al. Securing instrumented environment sover content-centric networking: the case of lighting control and NDN[J]. Computer Communications Workshops (INFOCOMWORKSHOPS), 2013,102(3): 394-398.
- [20] BURKE J GASTI P, NATHAN N, et al. Secure sensing over named data networking[J]. IEEE 13th International Symposium on Network Computing and Applications(NCA), 2014, 44(3): 175-180.
- [21] LENORD M J, POLYZOS G C. Energy efficient context based forwarding strategy in named data networking of things[C]//Centric Networking. 2016: 249-254.
- [22] ENGUEHARD M, DROMS R, ROSSI D. Slict: secure localized information centric things[C]//ACM Conference on Information, Centric Networking. 2016: 255-260.
- [23] VURAL S, NAVARATNAM P, WANG N, et al. In-network caching of internet-of-things data[C]//In Communications(ICC), 2014 IEEE International Conference on, 2014: 3185-3190.
- [24] QUEVEDO J, CORUJO D, AGUIAR R. Consumer driven information freshness approach for content centric networking[C]//Computer Communications Workshops, 2014, 15(4): 482-487.
- [25] MALIK A M, BORGH J. Attribute-based encryption on a resource constrained sensor in an information-centric network[C]//The 2016 Conference on 3rd ACM Conference on Information-Centric Networking.2016: 217-218.
- [26] COMPAGNO A, CONTI M, DROMS R. OnboardICNg: a secure protocol for on-boarding iotdevices in ICN[C]//The 3rd ACM Conference on Information Centric Networking, 2016: 166-175.
- [27] GNAWALI O, FONSECA R, JAMIESON K, et al. Collection tree protocol[C]//The 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2009: 1-14.
- [28] CHAI W, HE D L, PSARAS I, et al. Cache “lessformore” in information-centric networks[C]//International IFIP TC6 Conference on Networking, 2012, 7289(7): 27-40.
- [29] LEVIS P, MADDE S, POLASTRE J, et al. Tinyos: an operating system for sensor networks[C]//Ambient Intelligence. 2005: 115-148.
- [30] FREY H, STOJMENOVIC I. Geographic and energy aware routing in sensor networks[M]//Handbook of Sensor Networks: Algorithms and Architectures, 2005: 381-415.

#### 作者简介:



陈博(1991-), 男, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为物联网体系结构、以信息为中心网络。



刘亮(1982-), 男, 北京邮电大学教授, 主要研究方向为物联网、群智感知网络。



马华东(1964-), 男, 北京邮电大学教授, 主要研究方向为多媒体系统与网络、物联网与传感网、视频理解与大数据分析。