



研究与开发

基于移动捎带的5G广域物联网信息传输方法研究

郭政¹, 徐乐², 张海英¹, 邹丰光³, 孟维晓¹

- (1. 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 中国信息通信科技集团有限公司烽火国际技术有限公司, 北京 100191;
3. 烽火通信科技股份有限公司, 湖北 武汉 430073)

摘 要: 针对偏远地区低速率、时延非敏感业务的入网问题, 提出了一种基于移动捎带的广域物联网信息传输方法。利用移动载体为物联网设备提供无感接入支持, 扩展了网络覆盖范围。在无基站信号覆盖区域, 移动载体与传感器建立连接, 获取传感器数据并存储, 具备5G接入条件时, 将感知信息卸载实现信息入网。提出了一种基于代价函数的数据缓存策略, 提高了信息捎带效率, 分析了移动捎带方案的覆盖性能, 并设计了一种基于远距离无线电(long range radio, LoRa)技术的硬件实现方案。仿真结果表明, 基于移动捎带的广域物联网信息传输方法能够提高物联网信息捎带效率, 并将5G网络的物联网覆盖范围扩大4.98倍, 实地测试验证了所提方法的有效性, 移动捎带节点可以实现半径4 km的通信覆盖。

关键词: 物联网; 业务分析; 缓存策略; 中继节点

中图分类号: TN925

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024080

Research on 5G wide-area Internet of things information transmission method based on mobile piggyback

GUO Zheng¹, XU Le², ZHANG Haiying¹, ZOU Fengguang³, MENG Weixiao¹

1. School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China
2. China Information Communication Technologies Group Corporation · FiberHome International Technologies Co., Ltd., Beijing 100191, China
3. FiberHome Telecommunication Technologies Co., Ltd., Wuhan 430073, China

Abstract: To solve the network access problem of low data rate and delay-insensitive services in remote areas, a wide-area Internet of things (IoT) information transmission method based on mobile piggyback was proposed. Mobile carriers were used to provide senseless access support for IoT devices and expand network coverage. In areas without base station signal coverage, the mobile carrier established a connection with the sensor, obtained sensor data and stored it. When 5G access conditions were met, the sensing information was offloaded to achieve information access to the net-

收稿日期: 2023-10-24; 修回日期: 2024-01-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2020YFE0205800); 黑龙江省重点研发计划项目 (No. JD22A001)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program (No. 2020YFE0205800), The Key Research and Development Program of Heilongjiang Province (No. JD22A001)



work. A data caching strategy based on cost function was proposed to improve the efficiency of information piggybacking. The coverage performance of the mobile piggyback scheme was analyzed and a hardware implementation scheme based on LoRa was designed. Simulation results show that the wide-area IoT information transmission method based on mobile piggyback can improve the efficiency of IoT information piggyback, and expand the coverage area of 5G network by 4.98 times. Field tests verify the effectiveness of the proposed method, and mobile piggyback nodes can achieve communication coverage with a radius of 4 km.

Key words: Internet of things, service analysis, caching strategy, relay node

0 引言

2019年5G商用以来,智能交通、智慧家居等一系列以提升用户生活体验为中心的应用场景出现,人类社会更加智能化。在广域非城市热点地区,有海量的传感器具有接入需求,它们与环境监测、智慧城市、森林防火相关联,具有低速率、时延非敏感、海量多连接的特点。尽管目前大部分城市热点地区已经部署5G,但是由于基站建设费用、能耗等限制因素的存在,实现5G网络的全覆盖还需要很长一段时间。覆盖范围不足带来了海量感知信息的入网问题,限制了万物互联的发展,海量机器终端数据收集设备需要一张支持广域接入的网络实现互联互通需求。

对于海量感知信息的入网问题,传统的解决方法主要采用多跳路由技术,通过建设一定数量的地面基站或网关节点作为固定接入点,实现网络的覆盖。然而,由于广域物联网下传感器节点之间的通信距离较远、发射功率有限且处于5G网络覆盖范围之外,多跳路由技术不能很好地适用。中继节点方式以其方便、灵活、高效的特点,被认为是广域网络下有效的数据收集方法。根据应用场景的不同,车辆、高铁、飞机、船舶、无人机、飞机等都可以作为移动中继节点^[1]。对于无地面网络覆盖的区域,如果存在一个或多个捎带节点将终端产生的数据存储、携带,随着节点的移动,当具备接入条件时将数据转发入网,这将大大提高5G网络的覆盖能力。针对低速率、时延非敏感业务,本文提出的移动捎带方

案利用社会发展中常用的交通工具,无须投入大量的地面基础设施建设成本,即可实现对传感器数据的无感捎带,在一定程度上减少了建设基站所需的人力物力财力,具有一定的经济效益和研究价值。

基于移动捎带的物联网非常需要网内缓存,以便以经济高效的方式将物联网数据通过多个设备快速传播^[2]。Quevedo等^[3]关注数据的新鲜度,提出了一种基于新鲜度的缓存策略。Vural等^[4]从物联网的角度讨论了信息中心网络(information-centric networking, ICN)中的缓存,考虑了不同的度量标准(如数据特性和内容流行度)以决定是否应该缓存特定的物联网数据。文献[5]提出了一种分布式概率缓存策略,即pCASTING。pCASTING考虑了数据的新鲜度、节点能量水平和存储能力,目标是提高节点的能量利用效率以及降低数据在网络中的检索时延。Banerjee等^[6]提出了一种贪婪缓存算法,该缓存策略主要考虑内容流行度,计算请求者对数据的传入请求总数以及物联网数据的相对流行度。Hahm等^[7]分析了低功耗物联网环境下的协同缓存策略,以最大化传感器休眠时间、降低节点能耗为优化目标,提出了一种协同缓存算法。目前的物联网缓存策略主要关注的是ICN-IoT缓存,大多数缓存策略基于路由节点缓存空间有限且传输带宽较大的假设,研究节点能耗以及缓存命中率等问题。然而本文提出的基于远距离无线电(long range radio, LoRa)技术的信息捎带方案,节点的缓存空间不是主要限制因素,低链路速率带来的传输时

延将成为不可忽略的因素。因此需要着重解决不同业务先后存储顺序固定,导致高时延要求业务滞后转发带来的信息失效、捎带效率下降的问题。

基于移动载体的无感捎带主要是利用道路中的过往车辆捎带信息,因此需要分析道路中车辆的空间分布以得到移动捎带的覆盖性能增益。随着信息技术的发展,利用部署在固定位置的检测器采集数据估计交通流密度的方式得到了广泛的应用^[8]。吴正等^[9]、Tang等^[10]通过数码摄像机对交通流参数包括交通流密度进行了测量和分析,得到了一些有意义的成果。在大多数基于实测数据得到的重要理论成果中,研究人员更多关注交通流量和交通流速度这2个参数^[11],利用理论模型推导交通流参数的研究较少。在交通流建模的研究中,研究人员主要用元胞自动机模型、排队论模型对交通流建模,将交通流离散化,却忽视了“流”的概念。

因此,本文基于物联网信息捎带思想,分析了物联网业务的关键技术指标,提出了基于代价函数的缓存策略,解决了捎带节点进行信息捎带时可能出现的高时延要求业务滞后转发带来的信息失效、捎带效率下降问题,随后分析了移动捎带方案的覆盖性能并提出了基于LoRa的捎带节点硬件实现方案。

1 基于移动捎带的5G广域物联网信息传输方法

5G基础建设费用昂贵以及覆盖范围不足带来了海量感知信息的入网问题,本文提出了一种能够扩展5G网络覆盖范围、延伸物联网触角的信息捎带方法。LoRa技术是低功耗广域网常用的技术之一,数据速率通常可以达到几十kbit/s,对于物联网中的小数据包业务具有很强的适用性。目前,LoRa技术已经应用在各行各业^[12]。5G广域物联网信息捎带场景如图1所示,在5G非覆盖区域,移动捎带节点通过车载LoRa网关定时发射广播信息,与传感器建立通信连接,获取传感器数据并存储。随着捎带节点的移动,当节点进入5G覆盖区域时,将感知信息卸载,实现5G接入功能。捎带节点利用常用的交通工具,即可实现对低速时延非敏感业务的无感捎带,节约了地面基础设施建设成本,具有巨大的经济效益。

1.1 物联网业务关键技术指标

由于捎带方案是基于移动载体实现偏远地区物联网信息入网的,与传统的地面网络覆盖相比,虽然扩大了覆盖范围,但也会带来通信速率低的问题,因此首先对该场景下的物联网业务关键技术指标进行分析。近年来,第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)

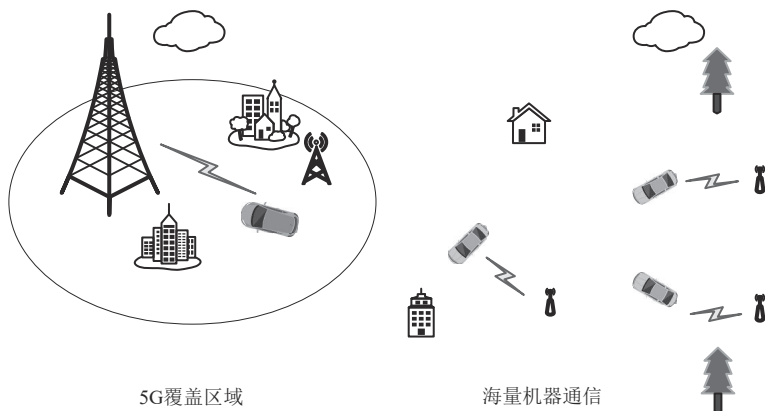


图1 5G广域物联网信息捎带场景



推出了一系列5G标准,如Release16、Release17、Release18等。根据3GPP技术标准,在广域物联网场景中,一个终端设备通过一个或多个其他设备与网络进行中继通信是有益的,低速时延非敏感业务的性能要求见表1^[13]。

由表1可知,智能测量、集装箱、货运车辆的中继速率要求很低,约为0.88 bit/s,且由于数据包大小通常为几百字节,捎带节点能够很好地解决此类业务的入网问题。

低速时延非敏感业务的一个经典用例是资产跟踪。许多利益相关者希望在全球多场景(如海运、空运、公路、铁路)下随时随地跟踪其资产(如机器、医疗设备、集装箱、托盘、手推车等)。资产跟踪不仅仅意味着需要知道资产的位置,还应包括其他信息,如资产状况和变化、环境因素(温湿度)、实时或间断监控等。资产跟踪业务性能要求见表2。

由表2可知资产跟踪的数据包大小通常为200 byte,最大为2 500 byte。信息上报频率为每天24次,即1小时1次,而对于其他业务如地形监测、智慧农业等,信息上报频率可以进一步降

低,因此基于移动捎带的物联网信息传输方案非常适用于此类业务。

此外,定期上报类业务广泛应用于蜂窝物联网^[14],如智能公共事业(气/水/电)计量报告、智慧农业、环境监测。移动自主报告(mobile autonomous reporting, MAR)流量模型可用于系统级仿真以及容量分析,周期性数据上报模型见表3。

1.2 基于代价函数的缓存策略

在捎带节点进行信息捎带时会出现信息失效、捎带效率下降问题,因此有必要进行缓存策略的研究。针对低速时延非敏感业务,综合考虑以下因素。

(1) 内容流行度 L_i ,定义为网络中某一类内容存在的数量占网络中所有内容数量的比例,可以表示为:

$$L_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^I n_i} \quad (1)$$

其中, i 表示特定的内容名, n 代表内容的数量, I 代表网络中的内容类别总数。

(2) 业务请求概率 r_{in} ,Fayazbakhsh等^[15]通过实验证明,不同地理位置的节点收到的内容请

表1 低速时延非敏感业务的性能要求

场景	最大数据速率 (UL)	最大端到端时延/s	设备密度
智慧工厂	5 Mbit/s	1	10 000个/工厂
智能测量	100 byte/ (15 min)	10	20 000个/km ²
集装箱	100 byte/ (15 min)	10	15 000个集装箱/船
货运车辆	100 byte/ (15 min)	10	120辆/列

表2 资产跟踪业务性能要求

场景	电池寿命/年	典型数据包大小/ byte	最大数据包大小/ byte	上报频率(次/天)
集装箱	12	200	2 500	24
货运车辆	20	200	2 500	24
托盘	7	300	300	24

表3 周期性数据上报模型

主要特点	
应用程序负载大小分布	4
定期到达时间	MAR周期性上报的到达时间间隔分布为: 1天 (40%)、2h (40%)、1h (15%) 和30 min (5%)

求概率接近 Zipf 分布, 因此内容请求概率 r_{in} 可以表示为:

$$r_{in}(r) = \frac{C}{r^\varphi} \quad (2)$$

其中, C 为常数, r 为数据的内容流行度排名, φ 为内容流行度参数, 决定内容流行度变化的程度。

(3) 时延容忍度 Δt , 不同物联网业务的时延容忍度分布 Δt 通常介于 10 ms 至 24 h 之间。当数据包实际传输时延 $T > \Delta t$ 时, 认为捎带信息失效。

(4) 数据包大小 S_d , 根据 3GPP 技术标准, 不同业务的数据包大小见表 1, 典型的低速时延非敏感业务数据包大小为 200~300 byte。

考虑业务数量为 N 的场景, 本文基于 LoRa 技术, 假设链路速率 v 为 5~10 kbit/s。源节点收到请求后, 将 t_{gen} 时刻产生的数据向请求者发送。假设数据在 t_{arr} 时刻达到请求者, 则数据年龄表达式^[16]:

$$t_{age} = t_{arr} - t_{gen} \quad (3)$$

进而数据的新鲜度可以表示为:

$$F = \frac{\Delta t - t_{age}}{\Delta t} = \frac{\Delta t - t_{trans} - t_{delay}}{\Delta t} \quad (4)$$

其中, t_{trans} 是源节点 S 和目的节点 R 之间的数据传输时延, 当数据被缓存在中间节点 i 时, 还会有一个额外的缓存时延, 即数据在被请求之前停留在缓存中的时间, 用 t_{delay} 表示。因此新鲜度损失函数可以表示为:

$$FL = \frac{t_{trans} + t_{delay}}{\Delta t} \quad (5)$$

当物联网数据存在于节点的缓存中时, 捎带节点才能响应对该数据的请求。因此, 首先定义数据在节点中存在的概率 P_e 。假设节点请求数据的输入概率为 r_{in} 。由于捎带节点只在缓存中不存在该数据时转发请求数据包, 因此捎带节点上同一数据的请求输出概率 r_{out} 为:

$$r_{out} = (1 - P_e) r_{in} \quad (6)$$

数据被捎带节点成功缓存的概率可以表示为:

$$r_c = r_d P_c \approx (1 - P_e) r_{in} P_c \quad (7)$$

其中, r_d 为数据到达率, P_c 表示数据包到达捎带节点时被缓存的概率。经过简单的变换, 可以得到 P_e 的表达式为:

$$P_e = \frac{r_{in} P_c}{\frac{1}{T_{res}} + r_{in} P_c} \quad (8)$$

其中, T_{res} 为业务数据的归一化剩余时间, 由式 (8) 可以得出, 数据在捎带节点 i 中存在的概率 P_e 是请求输入概率 r_{in} 和缓存概率 P_c 的函数。令 $P_e(i)$ 表示数据在第 i 跳的存在概率, 则第 i 跳节点返回数据的概率 $P_{re}\{i\}$ 和平均新鲜度损失 $FC(i)$ 可以分别表示为:

$$P_{re}\{i\} = P_e(i) \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_e(j)) \quad (9)$$

$$FC(i) = P_e(i) s_d E[FL(i)] +$$

$$\sum_{j=i+1}^N \left(\prod_{k=i}^{j-1} (1 - P_e(k)) \right) P_e(j) s_d E[FL(i)] \quad (10)$$

其中, S_d 为数据包大小, $E[FL(i)]$ 为任意时刻从节点 i 返回的数据的每比特期望新鲜度损失。考虑请求的到达时间服从指数分布, 且当数据在第 i 跳节点上不存在时, 节点 i 会将请求转发到下一跳 $i+1$ 节点处, 如果下一跳仍然没有该数据, 则继续向下一跳寻找直至源节点, 因此, 平均每比特期望新鲜度损失可以表示为:

$$E[FL(i)] = FL(i) + (1 - P_e(i)) \times \left\{ P_e(i+1) E[FL(i+1)] + \dots + \left(\prod_{j=i+1}^{N-2} (1 - P_e(j)) \right) P_e(N-1) E[FL(N-1)] \right\} \quad (11)$$

进一步, 数据新鲜度损失的代价函数可以表示为:

$$C(i)_{0 \leq i \leq N} = \frac{FC(i)}{T_{res}/\Delta t} = P_e(i) s_d \frac{E[FL(i)]}{T_{res}/\Delta t} + \sum_{j=i+1}^N \left(\prod_{k=i}^{j-1} (1 - P_e(k)) \right) P_e(j) \left[s_d \frac{E[FL(i)]}{T_{res}/\Delta t} \right] \quad (12)$$



基于代价函数的缓存策略算法流程如图2所示。

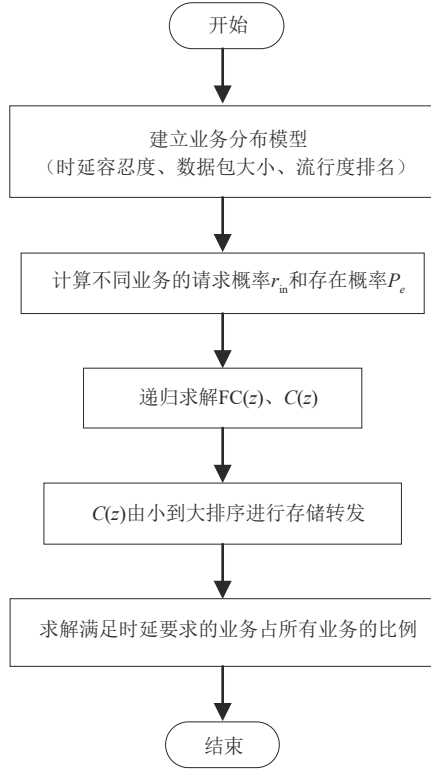


图2 基于代价函数的缓存策略算法流程

1.3 移动捎带物联网覆盖性能分析

为了衡量移动捎带方案对5G网络覆盖范围的增强效果,本节对覆盖性能进行分析。首先建立单车道和多车道道路模型,得到车辆分布的概率密度函数与车间距分布函数,然后在此基础上分析了移动捎带方案的覆盖性能。

(1) 单车道道路场景

单车道道路场景如图3所示,在单车道道路

上,令基站刚好不能覆盖处的横坐标为 $X=0$,且自由流条件下车辆到达服从参数为 λ 的泊松分布。

若将某车辆进入路段并于 t 时刻位于路段内某一位置抽象为 K 类,令车辆在 t 时刻到达给定区间 $[x,y]$ 的概率为 $P_t[x,y]$,那么在 t 时刻位于区间 $[x,y]$ 的车辆数 $M_t[x,y]$ 也服从泊松分布,且泊松分布的参数为 $\lambda t P_t[x,y]$,车辆数 $M_t[x,y]$ 对应的概率可以表示为:

$$P_t\{M_t[x,y]=m\} = e^{-\lambda t P_t[x,y]} \frac{(\lambda t P_t[x,y])^m}{m!} \quad (13)$$

此时,只需要求解泊松分布的参数 $\lambda t P_t[x,y]$ 。因为 λ 和 t 都是已知量,故只需要对 $P_t[x,y]$ 求解。为保证车辆在 t 时刻能够到达区间 $[x,y]$,车辆速度 $v(\tau)$ 需要满足:

$$x < v(\tau)(t - \tau) < y \quad (14)$$

其中, τ 表示车辆到达路口 $X=0$ 的时刻。假设每辆车进入路段后匀速行驶,并且服从高斯分布,概率分布函数为 $f_v(v)$,累积分布函数为 $F_v(v)$,则该车辆于 t 时刻到达区间 $[x,y]$ 的概率为:

$$F_v\left(\frac{y}{t-\tau}\right) - F_v\left(\frac{x}{t-\tau}\right) \quad (15)$$

由于车辆的到达过程服从参数为 λ 的泊松分布,因此车辆在 t 时刻到达给定区间 $[x,y]$ 的概率 $P_t[x,y]$ 为非均匀的泊松过程:

$$P_t[x,y] = \frac{1}{t} \int_0^t P_i(\tau) d\tau = \frac{1}{t} \int_0^t \left[F_v\left(\frac{y}{t-\tau}\right) - F_v\left(\frac{x}{t-\tau}\right) \right] d\tau \quad (16)$$

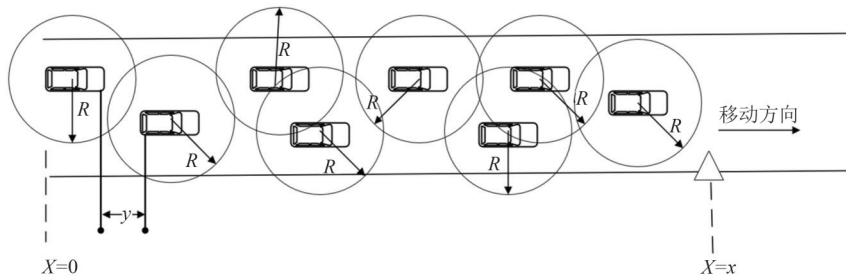


图3 单车道道路场景

进一步可以得到在固定区域内车辆数的泊松分布参数为:

$$\lambda t P_t[x, y] = \lambda \left[\int_0^t F_v \left(\frac{y}{t-\tau} \right) d\tau - \int_0^t F_v \left(\frac{x}{t-\tau} \right) d\tau \right] =$$

$$\lambda y \int_{\frac{y}{t}}^{\infty} F_v(v) \frac{1}{v^2} dv - \lambda x \int_{\frac{x}{t}}^{\infty} F_v(v) \frac{1}{v^2} dv \quad (17)$$

考虑道路交通状态达到稳定的情况, 即 $t \rightarrow \infty$ 时, 可以得到:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda t P_t[x, y] = \lim_{t \rightarrow \infty} \lambda y \int_0^{\infty} F_v(v) \frac{1}{v^2} dv -$$

$$\lambda x \int_0^{\infty} F_v(v) \frac{1}{v^2} dv = \lambda(y-x) \int_0^{\infty} F_v(v) \frac{1}{v^2} dv \quad (18)$$

为了防止车辆出现小于0或接近于0的速度, 定义 $v_{\max}$ 和 $v_{\min}$ 为车辆的最高和最小行驶速度, 此时车辆速度服从截断高斯分布, 其概率密度函数可以表示为:

$$g_V(v) = \frac{f_V(v)}{\int_{v_{\min}}^{v_{\max}} f_V(u) du} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left(\frac{-(v-\mu)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (19)$$

其中, μ 和 σ^2 分别表示车辆速度的均值和方差。

利用软件通过速度法仿真统计车辆空间样本数, 并与泊松分布的理论值对比, 泊松分布理论值与样本值的频率分布直方图如图4所示。可以发现, 参数为 $\lambda(y-x) \int_0^{\infty} F_v(v) \frac{1}{v^2} dv$ 的泊松分布概率密度函数频率分布直方图能较好地拟合车辆空间样本数据。

(2) 多车道交通流场景

以双车道为例, 多车道仅为双车道的一个维数扩充。双车道不同向车流交通场景如图5所示。

双车道不同向车流也可认为是两个独立的单车道组成, 在不超车的情况下, 车道之间互不影响。设车道B的车辆速度为 v , 车道A的车

辆速度为 $-v$, 在 $|v_{\max}|$ 和 $|v_{\min}|$ 相同的情况下, 两车道的速率都服从截断高斯分布。速率 $v(\tau)$ 需要满足:

$$x' - y < v(\tau)(t - \tau) < x' - x \quad (20)$$

$$\frac{x' - y}{t - \tau} < v(\tau) < \frac{x' - x}{t - \tau} \quad (21)$$

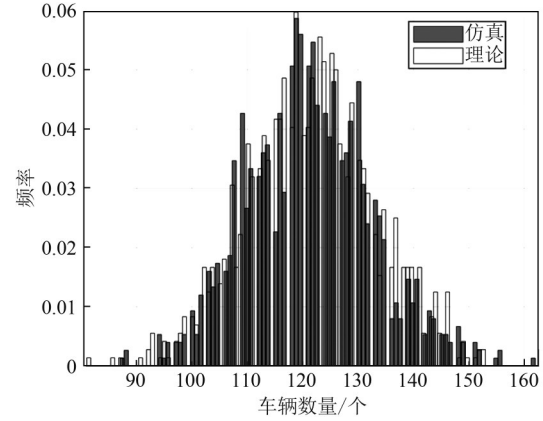


图4 泊松分布理论值与样本值的频率分布直方图

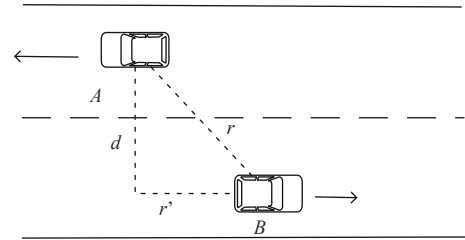


图5 双车道不同向车流交通场景

其中, x' 表示能覆盖的最大距离。由式 (21) 可以得到车道A中车辆到达区域 $[x, y]$ 的概率:

$$F_v \left(\frac{x' - x}{t - \tau} \right) - F_v \left(\frac{x' - y}{t - \tau} \right) \quad (22)$$

在 t 时刻区间 $[x, y]$ 的车辆数 $M_t[x, y]$ 服从参数为 $\lambda t P_t[x, y]$ 的泊松分布, 因此在 t 时刻到达给定区间 $[x, y]$ 的概率 $P_t[x, y]$ 可以表示为:

$$P_t[x, y] = \frac{1}{t} \int_0^t P_i(\tau) d\tau =$$

$$\frac{1}{t} \int_0^t \left[F_v \left(\frac{x' - x}{t - \tau} \right) - F_v \left(\frac{x' - y}{t - \tau} \right) \right] d\tau \quad (23)$$

进一步其泊松分布参数可以表示为:



$$\begin{aligned} \lambda t P_t[x, y] &= \lambda \left[\int_0^t F_v \left(\frac{x' - x}{t - \tau} \right) d\tau - \int_0^t F_v \left(\frac{x' - y}{t - \tau} \right) d\tau \right] = \\ &= \lambda (x' - x) \int_{\frac{x' - x}{t}}^{\infty} F_v(v) \frac{1}{v^2} dv - \lambda (x' - y) \int_{\frac{x' - y}{t}}^{\infty} F_v(v) \frac{1}{v^2} dv \end{aligned} \quad (24)$$

同理, 考虑道路交通达到稳定状态的情况, 即 $t \rightarrow \infty$, 且 $x \rightarrow y$, 可得:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \lambda t P_t[x, y] &= \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \lambda \left[\int_0^t F_v \left(\frac{x' - y}{t - \tau} \right) d\tau - \int_0^t F_v \left(\frac{x' - x}{t - \tau} \right) d\tau \right] &\approx \\ \lambda (y - x) \int_0^{\infty} F_v(v) \frac{1}{v^2} dv \end{aligned} \quad (25)$$

设 A 车道车辆到达率为 $-\lambda_A$, B 车道车辆到达率为 λ_B , 则在固定区域 $[x, y]$ 内, 交通流密度 ρ 可以表示为:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_A + \rho_B = \rho_B - |\rho_A| = \\ &= \frac{2(\lambda_B - \lambda_A)}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} \frac{1}{v} \exp \left(\frac{-(v - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) dv \\ &= \operatorname{erf} \left(\frac{v_{\max} - \mu}{\sigma \sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{v_{\min} - \mu}{\sigma \sqrt{2}} \right) \end{aligned} \quad (26)$$

令 P_s 表示连续两辆车在同车道的概率, 位于不同车道的概率为 $P_d = 1 - P_s$, 则车间距 y 的概率密度函数和累积分布函数可以分别表示为:

$$f_y = P_s \rho e^{-\rho y} + P_d \rho e^{-\rho \sqrt{d^2 + y^2}} \quad (27)$$

$$F_y = \int_0^y f_r dr \quad (28)$$

(3) 覆盖性能分析

由文献[17]的结论, 可知车辆在公路上某区域的行驶时间服从对数正态分布, 令 t_{car} 表示行驶时间, 其概率密度函数可以表示为:

$$f(t_{\text{car}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{t_{\text{car}}} t_{\text{car}}} \exp \left(-\frac{(\ln t_{\text{car}} - \mu_{t_{\text{car}}})^2}{2\sigma_{t_{\text{car}}}^2} \right) \quad (29)$$

进一步可以得到 t_{car} 的均值和方差:

$$E(t_{\text{car}}) = e^{\mu + \sigma^2/2} \quad (30)$$

$$D(t_{\text{car}}) = (e^{\sigma^2} - 1) e^{2\mu + \sigma^2} \quad (31)$$

本文取均值 $E(t_{\text{car}}) = \frac{R_{\text{sensor}}}{\mu_v} \cdot \rho$, $D(t_{\text{car}}) = 1$,

则参数 μ 和 σ 可以表示为:

$$\mu = \ln[E(X)] - \frac{1}{2} \ln \left[1 + \frac{D(X)}{E(X)^2} \right] \quad (32)$$

$$\sigma = \sqrt{\ln \left[1 + \frac{D(X)}{E(X)^2} \right]} \quad (33)$$

其中, R_{sensor} 为传感器的覆盖半径, 与传感器上报数据的速率 R_b 有关, μ_v 为车辆速率的均值, ρ 为交通流密度, 与车辆到达率 λ 有关。

设车辆在 t 时刻进入传感器信息采集区域, 由于每个上报时间间隔的分析类似, 不妨选取 $[0:00, 2:00]$ 时段进行分析。将二维区域道路网络栅格化, 每个小区域的面积用 S_{area} 表示, 则该区域内的车辆数 N_{total} 可以表示为:

$$N_{\text{total}} = \rho S_{\text{area}} \quad (34)$$

设车辆在区域内均匀分布, 则可以完整采集上报数据的车辆数 N_{car} 为:

$$\begin{aligned} N_{\text{car}} &= \rho \pi R_{\text{sensor}}^2 P((7200 - t) + 4 \leq t_{\text{car}} < (14400 - t)) = \\ &= \rho \pi R_{\text{sensor}}^2 \int_{7204-t}^{14400-t} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{t_{\text{car}}} t_{\text{car}}} \exp \left(-\frac{(\ln t_{\text{car}} - \mu_{t_{\text{car}}})^2}{2\sigma_{t_{\text{car}}}^2} \right) dt_{\text{car}} \end{aligned} \quad (35)$$

将式 (35) 化简可以得到:

$$\begin{aligned} N_{\text{car}} &= \int_{7204-t}^{14400-t} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{t_{\text{car}}} t_{\text{car}}} \\ &\exp \left(-\frac{(\ln t_{\text{car}} - \frac{R_{\text{sensor}}}{\mu_v} \cdot \rho)^2}{2\sigma_{t_{\text{car}}}^2} \right) dt_{\text{car}} \end{aligned} \quad (36)$$

因此, 信息捎带的覆盖概率可以表示为:

$$p_{\text{success}} = \frac{N_{\text{car}}}{N_{\text{total}}} = \frac{\rho \pi R_{\text{sensor}}^2 \int_{7204-t}^{14400-t} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{t_{\text{car}}} t_{\text{car}}} \exp \left(-\frac{(\ln t_{\text{car}} - \frac{R_{\text{sensor}}}{\mu_v} \cdot \rho)^2}{2\sigma_{t_{\text{car}}}^2} \right) dt_{\text{car}}}{\rho S_{\text{area}}} \quad (37)$$

$$= \frac{\pi R_{\text{sensor}}^2}{S_{\text{area}}} \int_{7204-t}^{14400-t} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{t_{\text{car}}} t_{\text{car}}} \exp \left(-\frac{(\ln t_{\text{car}} - \frac{R_{\text{sensor}}}{\mu_v} \cdot \rho)^2}{2\sigma_{t_{\text{car}}}^2} \right) dt_{\text{car}}$$

1.4 移动捎带平台硬件实现方案

为验证设计方案的可行性,本文进行了硬件系统的设计与实现工作,将系统分为信息采集子系统、中继节点子系统、5G接入子系统3部分,完成传感器信息的采集、存储、入网功能,移动捎带平台硬件实现方案如图6所示。

在信息采集子系统中,根据应用场景的不同,可以采用高精度传感器对温湿度、风速风向等信息进行监测。对于高速率业务如视频流业务,采用Wi-Fi技术实现视频信息的快速传输。信息采集子系统所需的硬件包括传感器、低功耗广域物联网终端模块如LoRa模块、NB-IoT模块等。本文采用RS485温湿度传感器、LoRa数传终端模块,二者通过RS485接口通信。LoRa模块在收到网关节点的指令后,将数据透明转发至传感器,完成信息采集功能。

传感器的通信协议采用RS485-MODBUS-RTU,默认波特率为9 600,8,n,1。传感器的数据读取、地址修改、波特率修改等操作都是基于16进制指令的。例如,需要读取某一时刻的温度数据时,上位机通过RS485接口发送数据查询指令01 03 00 00 00 01 84 0A,当传感器收到正确的指令后,返回温度数据01 03 02 0b 48 79 A6,温湿度传感器响应数据帧格式见表4。数据0b 48对应于十进制数据2 888,采用的温湿度传感器倍率为10,因此实际温度数据为28.88℃。

表4 温湿度传感器响应数据帧格式

地址	功能码	长度	数据1	校验码
01	03	02	0b 48	79 A6

移动捎带节点子系统采用的硬件为LoRa网关节点、Jetson NX开发板、5G模块、Wi-Fi模块,完成感知信息存储、防碰撞处理、5G模块

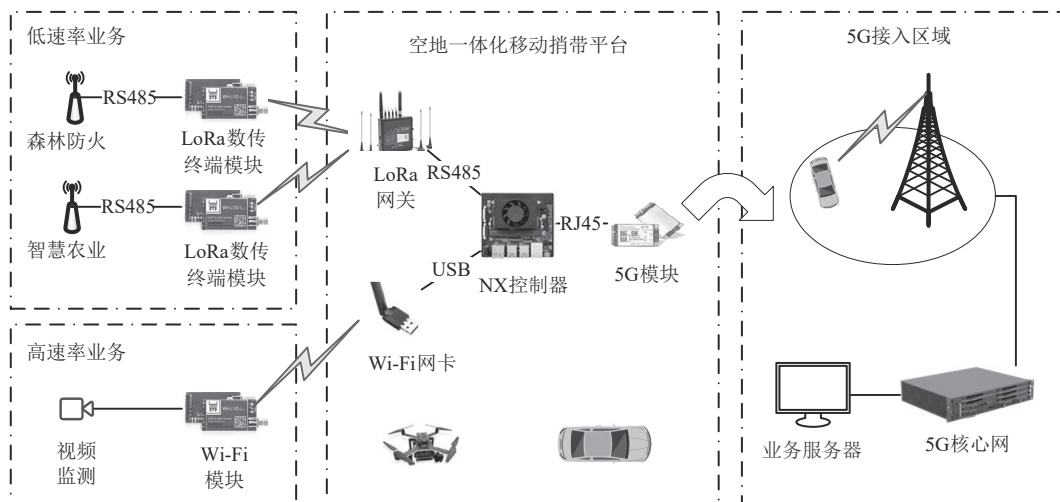


图6 移动捎带平台硬件实现方案

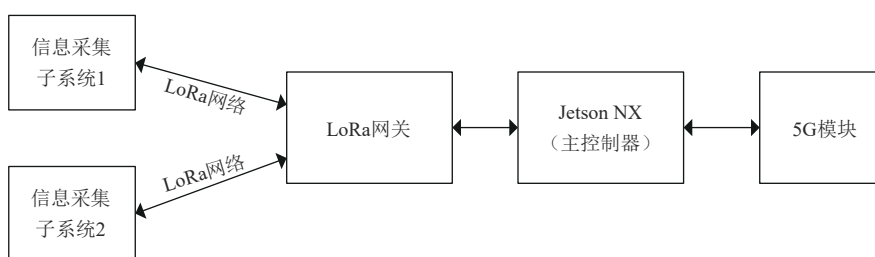


图7 移动捎带节点核心模块

网口通信等功能，移动捎带节点核心模块如图7所示。LoRa网关节点通过RS485接口与Jetson NX开发板连接，同时通过无线链路与信息采集子系统建立通信连接。Jetson NX开发板发送数据帧至LoRa网关后，LoRa网关将该数据帧以广播的形式发送，所有成功入网的节点都可以接收到该数据帧并发送至传感器，正确识别数据查询指令的传感器通过LoRa模块、LoRa网关将传感数据返回给控制器，完成传感器信息上报、存储功能。

另一方面，Jetson NX控制器与5G模块通过RJ45网口相连。控制器定时向5G模块发送拨号指令，检测捎带节点是否处于5G覆盖区域，拨号成功后，通过高速数据网口将存储的数据发送至基站侧业务服务器。

5G接入子系统由5G基站、交换机以及核心网等构成，可以利用现有三大运营商的地面网络或搭建专网系统实现数据入网。具体地，通过专网或公网进行数据传输是由5G模块SIM卡槽中的卡类型决定的。本文通过搭建专网小基站系统实现，使用时需要烧制SIM卡信息，包括鉴权密钥、基站IP分配信息等，同时需要对专网小基站的工作模式、小区标识、工作频段进行配置。配备5G模块的移动捎带平台进入5G覆盖区域并且成功入网后，与基站侧的业务服务器建立TCP连接，通过socket完成数据上传。为了更加直观地观测传感器数据的变化情况，在基站侧设计了信息监测界面。

2 仿真分析与实地测试

本节首先通过仿真实验，分析基于代价函数的缓存策略对业务缓存命中率的影响以及网络参数对移动捎带传输方案覆盖性能的影响，随后搭建移动捎带平台，通过实地测试，论证了本文所提方法在广域覆盖能力方面的优势。

2.1 缓存命中率分析

首先分析基于代价函数的缓存策略的性能优势。主要考虑以下两个性能指标。

(1) 缓存命中率 K ，用于衡量缓存策略为广域物联网业务提供5G接入支持的能力。定义为捎带业务中满足时延要求的业务数量占所有捎带业务数量的比例：

$$K = \frac{\sum_{i \leq T} n_i}{\sum n_i} \quad (38)$$

(2) 不同业务缓存命中率的概率分布 φ ，用于描述缓存策略对于不同业务的适应性。定义为不同时延要求业务各自的缓存命中率：

$$\varphi_q = \frac{\sum_{i \leq T} n_{i,q}}{\sum n_{i,q}} \quad (39)$$

仿真参数设置见表5。

图8所示为业务中心数据包大小对缓存性能的影响。仿真结果表明，在节点数为20 000、中心数据包大小为300 byte时，所提算法的缓存命中率与小数据包优先算法、时延升序算法、先入先出策略相比，分别提高了约8%、15%、20%。随着业务中心数据包大小的增加，4种缓存策略

的命中率均下降,这是由于数据包大小的增加使得捎带节点中的数据占据了较大存储空间,数据的入网时延会大大增加,业务在入网时已经失效,进而体现为缓存命中率降低。

表5 仿真参数设置

仿真参数	取值
N	20 000
S_d	200~800 byte
φ	0.8
v	10 kbit/s
Δt	day(40%)、hour(40%)、min(20%)
P_c	1

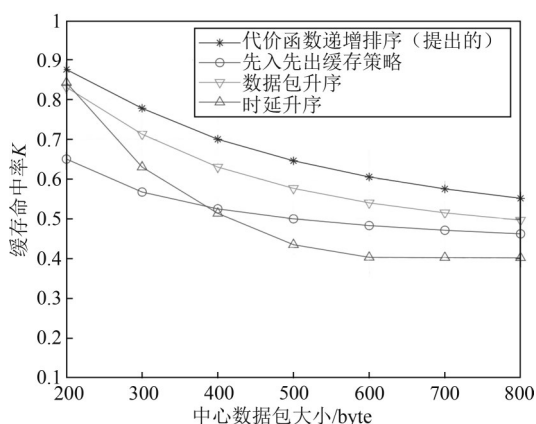


图8 业务中心数据包大小对缓存策略性能的影响

图9仿真所示为缓存命中率的分布情况。可以看到,基于代价函数的缓存策略相比其他缓存策略具有更好的适用性,能够有效提高信息

的捎带效率。

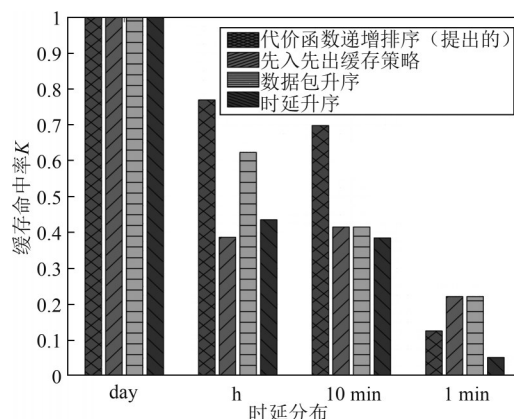


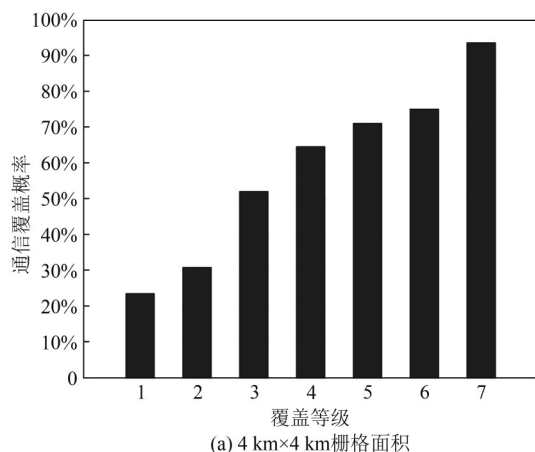
图9 缓存命中率分布情况

由此可以得出结论,基于代价函数的缓存策略综合考虑了物联网业务的多维数据特征,包括内容流行度、时延容忍度、传入请求的概率、数据包大小等,仿真结果表明,在实际物联网业务分布模型下,代价函数具有良好的性能。

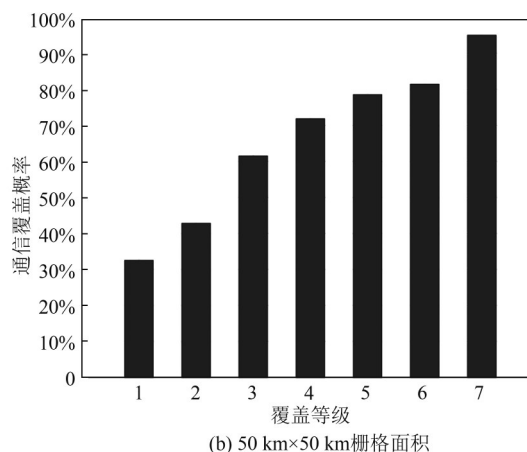
2.2 覆盖性能分析

对黑龙江省区域进行栅格化处理,不同的数据速率 R_b 对应于不同的覆盖面积。在绘制覆盖等级图时,分别用不同的栅格区域面积代表不同的数据传输速率 R_b ,本文划分的栅格面积分别为4 km×4 km和50 km×50 km,得到不同栅格下各覆盖等级的覆盖概率如图10所示。

统计图10中两种传输速率的覆盖等级占比,



(a) 4 km×4 km栅格面积



(b) 50 km×50 km栅格面积

图10 不同栅格下各覆盖等级的覆盖概率



如图11所示。在 $4\text{ km}\times 4\text{ km}$ 情况下,无覆盖区域占比较大,高等级覆盖区域占比少。在 $50\text{ km}\times 50\text{ km}$ 情况下,无覆盖区域占比明显减小,高等级覆盖区域占比增大,这是因为数据传输速率 R_b 减小后,传感器有效覆盖区域增加,使得在时刻 t 下,覆盖区域内车辆数增加。

图12显示了黑龙江省信息捎带前后5G覆盖区域的统计。当以通信覆盖概率60%为阈值时, $4\text{ km}\times 4\text{ km}$ 栅格下对高速率业务的覆盖面积可扩大2.26倍,而在低速率业务场景下的 $50\text{ km}\times 50\text{ km}$ 栅格中,5G网络的覆盖范围可以扩大4.98倍,体现了捎带式移动物联网对5G覆盖区域的显著增强效果。

2.3 硬件系统实地测试

为了验证捎带装置的工作效果,本文进行了实地测试。移动捎带节点和传感器分别位于直线

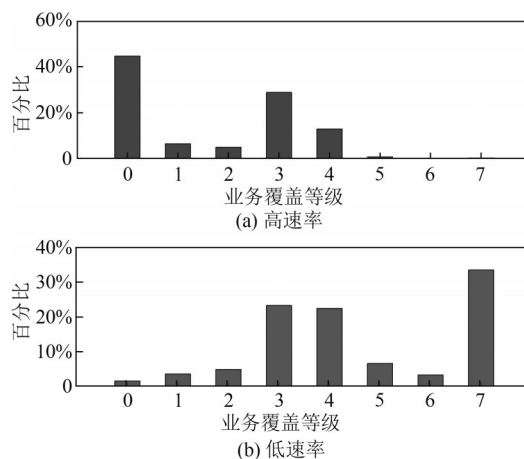


图11 两种传输速率的覆盖等级占比

距离 4 km 的两点,实地测试效果如图13所示,测试结果表明,本文搭建的硬件系统完成了广域物联网场景下物联网信息的采集、捎带和入网功能,在硬件层面验证了本文提出的捎带方案在支持广域物联网信息传输方面的能力。

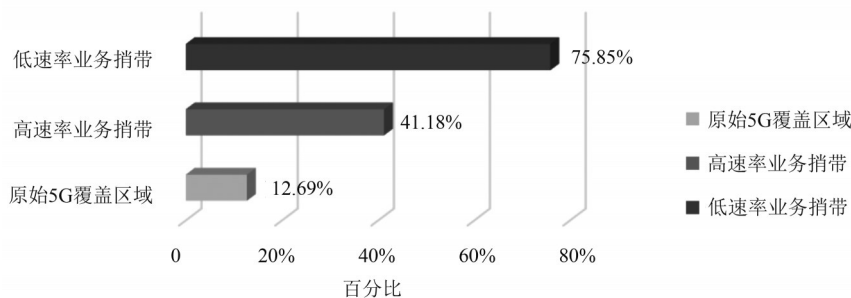
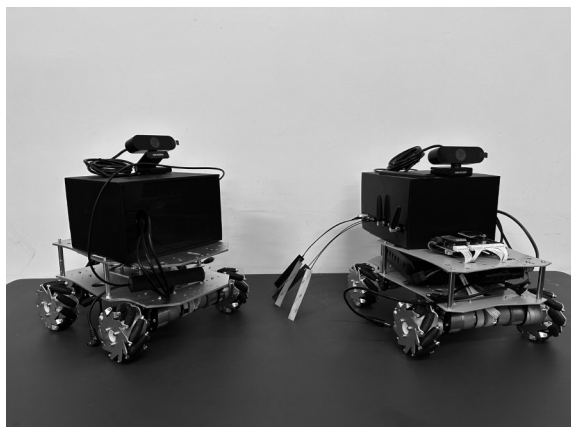
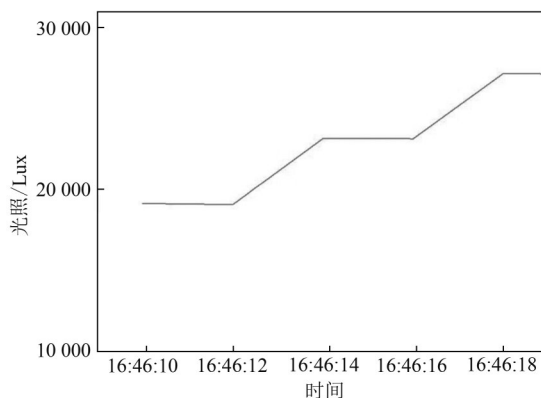


图12 黑龙江省信息捎带前后5G覆盖区域占比



(a) 移动捎带平台样机



(b) 服务器信息显示界面

图13 实地测试效果

3 结束语

本文针对5G基础建设费用昂贵以及覆盖范围不足带来的海量感知信息入网问题,提出了一种基于移动捎带的5G广域物联网信息传输方法。对物联网业务关键技术指标进行了分析,基于代价函数的缓存策略能够有效提高缓存命中率,并且对于时延敏感性差异较大的业务也具有很强的适用性。随后研究了基于移动捎带的二维道路网络覆盖性能,推导了捎带信息覆盖率的数学表达式,分析了该指标的影响因素。以覆盖概率60%为标准,低速业务信息捎带后5G网络的覆盖范围可以扩大至4.98倍。最后,本文给出了捎带节点的硬件实现方案。实地测试表明,捎带方案能够为广域物联网中的低速率时延非敏感业务提供有效的5G接入支持,在一定程度上解决海量感知信息的入网问题。未来可以考虑移动节点的移动轨迹,提出一种业务自适应的捎带技术,充分发挥空天地中各类移动载体的优势,实现全空间、多维度的信息捎带。

参考文献:

- [1] 宋朝,郑迎凤,赵文彬.一种有效的稀疏无线传感器网络路由方案[J].电信科学,2016,32(4):59-64.
SONG C, ZHENG Y F, ZHAO W B. An effective routing scheme of sparse wireless sensor networks[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(4): 59-64.
- [2] NOUR B, SHARIF K, LI F, et al. NCP: a near ICN cache placement scheme for IoT-based traffic class[C]//Proceedings of the 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [3] QUEVEDO J, CORUJO D, AGUIAR R. Consumer driven information freshness approach for content centric networking[C]//Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Piscataway: IEEE Press, 2014: 482-487.
- [4] VURAL S, NAVARATNAM P, WANG N, et al. In-network caching of Internet-of-things data[C]//Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2014: 3185-3190.
- [5] HAIL M A, AMADEO M, MOLINARO A, et al. Caching in Named Data Networking for the wireless Internet of Things[C]//Proceedings of the 2015 International Conference on Recent Advances in Internet of Things (RIoT). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [6] BANERJEE B, SEETHARAM A, TELLAMBURA C. Greedy caching: a latency-aware caching strategy for information-centric networks[C]//Proceedings of the 2017 IFIP Networking Conference (IFIP Networking) and Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-9.
- [7] HAHM O, BACCELLI E, SCHMIDT T C, et al. Low-power Internet of things with NDN & cooperative caching[C]//Proceedings of the Proceedings of the 4th ACM Conference on Information-Centric Networking. New York: ACM Press, 2017: 98-108.
- [8] 胡小文,杨东援.城市快速道路交通流密度的估计[J].交通运输系统工程与信息,2008,8(3):79-82.
HU X W, YANG D Y. Estimation of traffic density on urban freeways[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(3): 79-82.
- [9] 吴正,朱辉,贾楠.基于快速路交通录像的交通流模型参数测量方法研究[J].复旦学报(自然科学版),2008,47(2):147-152.
WU Z, ZHU H, JIA N. Measuring method study of the traffic flow model parameters based on video recording of expressway traffic[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2008, 47(2): 147-152.
- [10] TANG T Q, WANG Y P, YANG X B, et al. A multilane traffic flow model accounting for lane width, lane-changing and the number of lanes[J]. Networks and Spatial Economics, 2014, 14(3): 465-483.
- [11] 刘安琪.城市实时交通流预测研究及应用[D].西安:西安电子科技大学,2019.
LIU A Q. Research and application on real-time traffic prediction in urban areas[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [12] 宋振雷,吴冬燕,张卫星,等.基于LoRa的智慧工厂环境监测系统的设计[J].电子制作,2021,29(9):79-81.
SONG Z L, WU D Y, ZHANG W X, et al. Design of smart factory environmental monitoring system based on LoRa[J]. Practical Electronics, 2021, 29(9): 79-81.
- [13] 3GPP. Service requirements for the 5G system: TS 22.261, v19.3.0[S]. 2023.
- [14] 3GPP. Cellular system support for ultra low complexity and low throughput internet of things: TR 45.820, v13.1.0[S]. 2015.
- [15] FAYAZBAKHSH S K, LIN Y, TOOTOONCHIAN A, et al. Less pain, most of the gain[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(4): 147-158.
- [16] 魏铭.基于信息新鲜度的可充电无线传感器网络工作调度策略研究[D].长春:吉林大学,2023.
WEI M. Research of task scheduling strategy in wireless rechargeable sensor networks based on information freshness[D].



Changchun: Jilin University, 2023.

- [17] 于晓桦, 王刚, 李成江. 基于时空关系对高速公路车辆出行规律的研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2009, 7(1): 116-121.

YU X H, WANG G, LI C J. Research on the travel law of free-way vehicles based on time and mileages[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2009, 7(1): 116-121.

[作者简介]



郭政 (1999-), 男, 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院博士生, 主要研究方向为物联网业务缓存与空天地一体化。



徐乐 (1984-), 男, 现就职于中国信息通信科技集团有限公司烽火国际技术有限公司, 主要研究方向为基于公共关系开展的科学技术管理。



张海英 (1999-), 女, 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院博士生, 主要研究方向为通信感知一体化波形设计、OTFS和信道估计。



邹丰光 (1988-), 男, 烽火通信科技股份有限公司研发项目经理, 主要从事光传输产品研发管理工作。



孟维晓 (1968-), 男, 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信与空天网络。