

文章编号:1007-5321(2021)02-0001-07

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-227

面向多源信息采集的地理位置路由寻址机制

侯赛凤, 田乐, 胡宇翔, 邬江兴

(信息工程大学 信息技术研究所, 郑州 450000)

摘要: 为满足日益增长的与地理位置相关的网络业务需求,在命名数据网络(NDN)的基础上,提出了面向多源信息采集的地理位置路由寻址机制. 设计了地理位置编码方案,将地理位置信息与NDN中的内容名称结合起来,支持面向位置的多源信息采集请求;在原始NDN路由转发框架下,提出了基于自学习的地理位置路由寻址机制,避免了路由通告带来的开销,并可兼容传统的NDN路由转发机制;最后,使用ndnSIM仿真平台实现了该机制并进行了实验验证. 验证结果表明了该路由寻址机制的有效性.

关键词: 命名数据网络;地理位置;多源信息

中图分类号: TP393.0

文献标志码: A

Geographic Routing and Addressing Scheme for Multi-Source Data Retrieval

HOU Sai-feng, TIAN Le, HU Yu-xiang, WU Jiang-xing

(Information Technology Institute, Information Engineering University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to meet the emerging location-related network services, a geographic location routing and addressing scheme for multi-source data retrieval is proposed on the basis of named-data networking (NDN). By combining geographic location information with content naming in NDN, a geographic location coding scheme is designed to support location-oriented multi-source data retrieval requests; Moreover, based on the NDN routing and forwarding framework, a self-learning geographic location routing and forwarding strategy is proposed. The strategy avoids the overhead caused by routing advertisement and is compatible with the traditional NDN routing and addressing mechanism; Finally, the proposed scheme is implemented on the NDN simulation platform and verified by experiments. The result shows the effectiveness of the routing mechanism.

Key words: named-data networking; geographic location; multi-source information

随着定位技术的发展,网络中的节点能够获取准确的地理位置信息,地理位置信息成为网络应用中经常用到的重要属性,位置服务(LBS, location based service)^[1]技术得到了广泛应用. 位置服务的

目的在于采用移动通信网络或全球卫星定位系统等手段获得终端用户的位置信息,然后使用位置信息为用户提供丰富的增值服务. 在人类动态活动的许多方面都体现了基于位置的服务,其市场发展前景

收稿日期: 2020-10-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB1802505)

作者简介: 侯赛凤(1996—),女,硕士生.

通信作者: 田乐(1987—),男,助理研究员, E-mail: le.tian2019@outlook.com.

巨大. 如在物流方面, 可让用户了解快件的大致路径和当前所处的站点, 明确地展示快件属于整体物流运输中的哪一环, 所处哪个城市, 并且预估送达时间.

随着物联网 (IoT, the Internet of things) 的广泛应用和部署, 与位置相关的服务日益成为当前的研究热点, 如互联网设备通过传感技术采集当前所处区域的信息 (温度、湿度), 利用各类通信手段将该信息传输给相关用户^[2]. 在该类应用中, 用户往往对某个特定地理位置区域相关的数据项感兴趣, 而不关心这些数据由哪些节点生成或采集. 造成上述情况的原因包括: ① 由于网络的动态性和分布密度, 无法预知信息生产者的确切数量和身份; ② 数据不是预先存储的, 而是拥有相关能力的节点根据需求生成的; ③ 请求多个不同位置的数据来提高应用的准确性.

上述应用通常采用一对多的通信模式, 用户发送单一消息, 请求特定地理位置区域内的相关信息, 收集该区域内所有节点的相关信息并返回给用户. 该通信与传统的 IP (Internet protocol) 有相似之处, 均采用一对多的传输方式, 组播源仅发送 1 次数据, 组播数据包使用组播路由协议建立组播分发树, 然后将数据传递给组播成员. 不同点在于, 其关注点为地理位置区域, 不关心该区域下节点的数目和身份信息, 称之为面向地理位置的多源信息采集.

为满足上述应用场景, Kai 等^[2]提出了一种匿名的地理路由转发机制来支持基于位置的 IoT 服务, 使用模糊位置进行路由转发, 但并未给出具体的路由计算方法且要求用户必须事前掌握具体的位置信息. Amadeo 等^[3]提出 IoT 场景下多源数据检索的路由转发机制, 不管生产者的数量和身份, 请求给定地理位置信息相关的所有数据, 但仅支持一跳场景. 为此, 提出面向多源信息采集的地理位置路由机制, 主要工作包括: ① 设计基于命名数据网络 (NDN, named-data networking) 的地理位置标识的生成机制; ② 提出基于自学习的路由生成和转发机制; ③ 通过仿真实验对上述机制进行了验证.

1 相关工作

1.1 地理位置编码模型

Kai 等^[2]采用四元数表示 x 和 y 坐标的位置, 例如可以用四元数 $z_0 z_1 \cdots z_{m-1}$ 表示某一位置. z 阶数

正方形由较大的正方形递归分割而成, 最高有效位 z_0 对应从最大的正方形分出的 4 个正方形中的一个, 如图 1 所示. 最大的正方形是由 4 个正方形组成的大正方形, 每一个正方形又被分成 4 个方块较小的正方形用同样的方法进行递归编号.

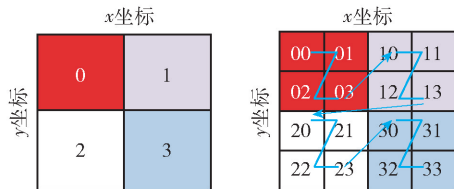


图 1 Z-Order 区域划分

董芳^[4]基于 TCP/IP (transmission control protocol/IP) 和地球剖分理论 (GeoSOT, geographical coordinate subdividing grid with one dimension integer coding on $2n$ -tree) 提出了网络地学编码模型. 为了实现地理空间信息与网络地址的紧密结合, 在 IP 地址中加入了 GeoSOT 编码. 为满足数据的空时应用需求, 基于该网络地学编码模型, 对通用地学编码模型进行实例化, 使得该模型能更好地适用于空间数据的网络化组织.

1.2 相关路由算法

在实际网络中, 为了实现组播数据包的转发, 组播路由协议必须在互连设备上运行. 组播路由协议可分为密集模式协议 (距离组播路由协议)、稀疏模式协议 (协议无关组播) 和链路状态协议 (开放式组播最短路径优先协议)^[5] 3 类.

Kai 等^[2]提出一种匿名的地理路由转发机制来支持基于位置的 IoT 服务, 笔者采用 Z-Order 对位置进行模糊命名, 使用模糊位置进行路由转发. 为了使 IoT 设备发送多个数据包, 修改了 NDN 的未决兴趣表 (PIT, pending interest table) 条目删除机制, 通过比较当前时间和 PIT 条目中的记录时间, 以预定的阈值时间推迟删除 PIT 条目. 为了一次触发多个数据, 消费者需要识别满足相同数据包的不同数据来源, 兴趣包名称组件包括一个共同的名称前缀和与生产者相关的名称组件. 同时, 需要适当设置 PIT 表项的生存时间.

Tortelli 等^[6]提出了基于内容驱动 Bloom 过滤器的域内路由算法 (COBRA, content-driven, bloom filter-based intradomain routing algorithm), 将稳定的布隆过滤器加入网络架构中, 按照最长前缀匹配方

法将接口进行排序. 葛国栋等^[7]提出了基于局部请求相似性的协作缓存路由机制. 考虑到由内容活跃度来选择路由转发接口, 同时与缓存方法共同作用, 提高节点范围内的命中率, 张岩等^[8]提出一种基于内容轨迹的多径路由策略, 利用内容轨迹对兴趣包的引导, 降低冗余传输, 增加网内缓存命中率.

1.3 NDN 简介

NDN^[9]是以数据为中心的新型网络体系结构. 与传统 IP 不同, NDN 为一定范围内的每个信息进行命名, 保持了 IP 体系结构的细腰特色并将信息名称作为网络的核心. 数据消费者驱动 NDN 的通信, 支持兴趣包和数据包 2 种包类型. 提供了基于名称的路由/转发功能, 从而允许通过这 2 种包使用应用数据名称直接通信.

NDN 节点包含转发信息表 (FIB, forwarding information base)、内容缓存 (CS, content store) 以及 PIT 三个主要的数据结构. 其转发流程^[10]为: 兴趣包请求到来后, 在 CS 中执行查找; 如果找到了与请求相应的数据, 则将数据返回; 如果没有找到, 则根据精确匹配在 PIT 中执行查找, 如果找到相应的 PIT 表项, 则更新 PIT 表项并丢弃该兴趣包; 如果没有找到相应表项, 按照最长前缀匹配原则继续在 FIB 中查找相应内容, 将兴趣包从对应的接口转发出去, 同时在 PIT 中创建新的表项, 记录该兴趣包的接口相关信息. 内容提供者收到请求后, 按照 PIT 表中的记录返回数据包.

2 基于地理位置的标识生成机制

为实现面向多源信息采集的地理位置路由寻址, 将地理位置信息与原始 NDN 中的名称命名结合起来. 对原始的 NDN 包格式进行改动, 在包中添加地理位置标识字段, 将经纬度信息进行编码, 写入地理位置标识字段中, 形成基于 NDN 的地理位置标识. 图 2 所示为支持地理位置的 NDN 包格式.

采用 Z-Order 对经纬度信息编码. Z-Order 将目标区域进行递归划分, 从最大的方格划分成较小的 4 个方格, 再分别从每个较小的方格划分出 4 个更小的方格, 依此类推. 以方格为最小单位, 1 个方格内至多放置 1 个节点. 假设目标物联网场景的物理范围为 S , 每个方格的面积为 $a \times a$. 首先将 S 扩展为 $S' = N \times N$ 的正方形区域, 使得该区域有 g^2 个方格, 可得出 $g = N/a$, 并且 g 为 2 的整数次幂, 即

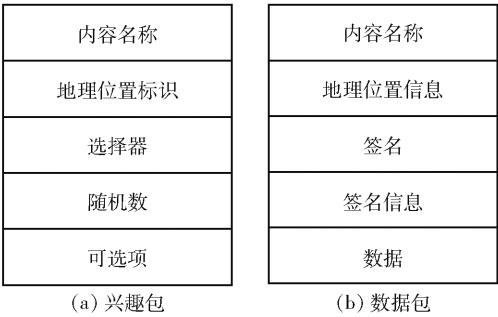


图 2 支持地理位置的 NDN 包格式

$g = 2^z$; 然后使用 Z-Order 对扩展后的区域 S' 编码. 图 3 所示为包含 16 个方格区域的 Z-Order 编码示例, 编码结果采用四进制.

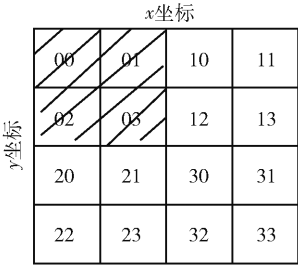


图 3 Z-Order 四进制编码示例

NDN 包格式中的地理位置标识表示为 Z-Order 坐标/掩码, 格式如图 4 所示.

位置信息有效位	Z-Order坐标位	掩码位
1 bit (0/1)	z bit	m bit

图 4 NDN 地理位置标识格式

图 4 中, 位置信息有效位表示对地理位置信息的已知性, 1 表示兴趣包和数据包与地理位置相关, 0 表示无关, 此时 Z-Order 坐标/掩码域不含任何有效信息. Z-Order 坐标位表示节点所在的位置 (方格), 掩码表示节点的覆盖范围. 一般而言, 由于往往关注兴趣包多个方格内的信息, 所以其掩码位的取值较为丰富, 而数据包一般仅携带单个方格内的信息, 因此掩码取值通常为全 1. 然而, 如果节点能力较强, 能够覆盖多个方格, 或者节点能够在 CS 内对位置不同但内容名称相同的数据包进行合并, 数据包的掩码也可以有其他取值.

Z-Order 坐标可用 z 个比特位表示, 那么在有 g^2 个方格的情况下, 满足

$$2^z = g^2 \tag{1}$$

Z-Order 掩码可用 m 个比特位表示, m 满足

$$2^m > z \quad (2)$$

取最小整数。

以图4为例,将包含16个方格的区域进行Z-Order编码,根据式(1)和式(2)可知,Z-Order坐标有4个比特位,掩码有3个比特位。下面通过3个例子对编码进行更为形象地描述。以阴影区域为例,其包含的区域为00,01,02,03(四进制),可以表示为0x(四进制),x为通配符。在提出的Z-Order坐标/掩码的格式中,可以表示为(二进制)

$$0000/1100 \quad (3)$$

但由于掩码是由连续的1和0组成的,所以为节省存储空间,掩码1100在地理位置标识中表示为010(十进制数值2),表示掩码长度为2。因此,阴影区域的地理位置标识如图5所示。

位置信息有效位	Z-Order坐标位	掩码位
1	000	010

图5 阴影区域的地理位置标识

以单个方块为例(见图3右上角),其区域表示为11(四进制),即0101/1111(二进制),其地理位置标识格式如图6所示。

位置信息有效位	Z-Order坐标位	掩码位
1	0101	100

图6 单个方格的地理位置标识格式

3 基于地理位置的路由转发机制

3.1 地理位置信息获取机制

对于事先明确地理位置属性的信息,基于第2节中描述的方法,消费者在发送兴趣包之前,将地理位置区域转换为Z-Order坐标及其掩码,生成地理位置标识,添加到兴趣包中。

对于位置信息不明确的数据,消费者在一开始发送兴趣包时不包含位置信息,即地理位置标识中的位置信息有效位为0。可以使满足该兴趣包的节点(生产者)返回数据包,同时对数据包中包含的地理位置信息进行编码,生成地理位置标识并添加到数据包中。消费者从收到的返回数据包中提取相关的地理位置信息,后续在发送兴趣包时可以绑定内容名称和地理位置。

3.2 基于自学习的路由生成机制

自学习是局域网和移动自组织网络中查找数据

包传递路径的常用机制。尤其在NDN网络中,PIT表的存在使得该机制被广泛应用。自学习机制中,节点在广播转发兴趣包并建立PIT表后,观察返回数据包的来源,然后创建相应的转发表条目,使得将来的数据包仅需要根据FIB表项信息实现单播转发。如图7所示,当第1个兴趣包首先由节点A发出时,该兴趣包被广播至所有节点。当兴趣包到达生产者节点E时,节点E返回相应的数据包,然后沿着兴趣包传输的反向路径,将数据包返回至节点A。同时,据此创建通往E的FIB条目,后续兴趣包按照该FIB条目以单播的形式到达生产者节点E^[11]。

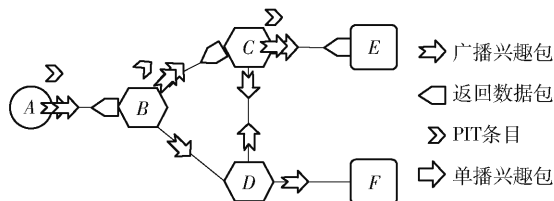


图7 NDN中基于广播的自学习

基于NDN中的广播自学习,笔者提出了面向地理位置区域的自学习路由机制。主要包括修改PIT工作机制,从而满足多源数据采集的需求,设计面向地理位置区域的路由寻址算法。下文所提到的广播,其范围均为目标地理区域内的所有节点。

3.2.1 多数据包的路由失效机制

在NDN中,当消费者接收到一个返回的数据包后,就会删除PIT表中与数据包名称相对应的PIT条目。而典型的物联网场景往往是多源数据检索,消费者同时请求来自不同源的相同类型的数据。但是,根据传统NDN的路由机制,在节点接收到1个数据包之后,在PIT中对应的条目就会被删除,然后在下一个数据包到达该节点后,节点在PIT表找不到相对应的条目,数据包就会被立刻丢弃。除非消费者再次发送兴趣包请求,才可以继续接收下一个数据包。为解决数据包丢失的问题,为每个PIT表项设置1个定时器M,在M时间内,若收到N-1(N为邻居节点的数目)个返回的匹配数据包,PIT表项失效并将其删除;当定时器M失效时,无论收到几个返回的数据包,PIT表项都视为失效并且被删除。

3.2.2 地理位置区域的路由生成机制

在路由学习阶段,节点首先对无法匹配的兴趣包进行广播转发并建立PIT表,当节点接收到针对PIT表项的数据包时,利用自学习机制建立相应的

FIB 表项,同时对具有相同转发接口的表项进行聚合,以减少表项数目。以图 3 为例,在路由学习阶段,若兴趣包的地理位置为整个区域,节点在转发该兴趣包并建立相应的 PIT 表项后,分别从接口 1 收到来自区域 {00,01,02} 的数据包,接口 2 收到来自区域 {12,13} 的数据包,接口 3 收到来自区域 {20,21} 的数据包,接口 4 收到来自区域 {30,33} 的数据包,则聚合后的 FIB 表如表 1 所示。掩码越长,表示表项的优先级越高。

表 1 FIB 示意图

编号	优先级	表示的区域 (二进制)	表项 (二进制)	下一跳接口
e_1	1	03	0011/1111	广播
e_2	1	30	1100/1111	接口 4
e_3	1	33	1111/1111	接口 4
e_4	2	12,13	0110/1110	接口 2
e_5	2	20,21	1000/1110	接口 3
e_6	3	00,01,02	0000/1100	接口 1

3.3 地理位置区域的查表转发

由于兴趣包本身的地理位置标识表示一个地理位置范围,而非准确值,所以设计了不同于最长前缀匹配的查表转发方法。

在查表转发阶段,节点收到兴趣包,然后基于 FIB 表按照优先级进行转发查表。当兴趣包 I 的地理位置标识 I_g 与 FIB 表项 e 满足 $e \subset I_g$ 时,即深度优先匹配^[12]时,继续查表,直到 I_g 被完全匹配,即

$$I_g \subseteq \{e_a \cup e_b \cup \dots \cup e_k\}$$

其中 e_a, e_b, \dots, e_k 为 k 与兴趣包深度优先匹配的表项。每一次匹配发生时,将兴趣包复制为 1 份,如 $e \subset I_g$,则将兴趣包的 I_g 修改为 e 并从相应的接口进行转发;否则,不对兴趣包做修改并从相应的接口进行转发。

以表 1 所示的 FIB 表为例,当地理位置标识为 $I_g: 1000/1000(\{20,21,22,23,30,31,32,33\})$ 的兴趣包到达该节点时,依次与表项 $e_2: 1100/1111, e_3: 1111/1111, e_5: 1000/1110$ 深度优先匹配。转发时,将兴趣包复制为 3 份,依次用 e_2, e_3, e_5 替换兴趣包中的地址位置并从接口 4,3 进行转发。

3.4 多源信息采集的地理位置路由寻址

下面结合内容名称,根据地理位置路由寻址算法流程,对面向多源信息采集的地理位置路由寻址

进行举例。

用户对图 3 所示区域 {12,13} 的温度感兴趣,发送名为 monitor/temperature 的兴趣包,并将地理位置标识设置为 0110/1110。当路由器接收到兴趣包后,首先在原始 NDN 的 FIB 表中查找兴趣包的内容名称 monitor/temperature 所对应的接口信息,如找到其对应的接口为 1,2 和 4;然后路由器在 FIB 表中根据地理位置标识 0110/1110 查找相应的转发接口。由 3.2 和 3.3 节可知,路由器找到其对应的接口为 2;最后,路由器将兴趣包转发到 2 个 FIB 表中查找的共同接口。具体地,将地理位置标识为 0110/1110 的兴趣包从接口 2 转发。地理位置路由寻址算法流程如下:

① 如果明确地理位置的属性,则信息有效位为 1,使用 Z-Order 编码生成地理位置标识,添加到兴趣包;否则,信息有效位为 0,采用传统的 NDN 路由转发兴趣包;

② 路由器节点接收到兴趣包 I ,从兴趣包 I 中提取位置信息,从原始 NDN 的 FIB 表中查找兴趣包内容名称对应的接口信息 e_f ,从位置 FIB 表中查找位置信息对应的接口信息 e_g ,最后,从 $e_f \cap e_g$ 的接口转发兴趣包;

③ 路由器节点收到返回的数据包,如果在定时器 M 时间内,收到的匹配数据包数小于 $N-1$,则维持 PIT 表项,等待下一个数据包返回;否则,删除 PIT 表项。

4 仿真分析

采用开源仿真平台 ndnSIM^[13] 评估面向地理位置的多源数据采集方案。ndnSIM 是一款基于 NS-3 开发而成的 NDN 仿真器,支持 NDN 中标准的兴趣和数据包格式,基于 FIB,CS,PIT 的数据结构以及相应的路由转发过程,首先在 ndnSIM 开源仿真平台上实现所提出的方案,然后进行相关实验,以评估其性能。

实验环境如下:所选的目标区域为 $1.6 \text{ km} \times 1.6 \text{ km}$ 的正方形,划分为 16×16 的方格,方格大小为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$,采用 Z-Order 对该区域划分编码。在每个方格中部署 1 个传感器节点,然后在此基础上放置 4 层路由器节点。第 1 层为 1 个根路由器,第 i 层路由器数目为 4^{i-1} 。1 个第 i 层路由器连接 4 个第 $i+1$ 层路由器。第 4 层共有 64 个路由器,每

个路由器覆盖4个传感器节点,从而覆盖目标区域内的所有传感器.在此基础上,为增强链路的稳健性,同一层的临近路由器之间,相邻层的临近路由器(或传感器)以概率 p 存在连接关系.路由器之间为有线传输,与传感器之间为无线通信.图8所示为1~3层路由器的示例拓扑.

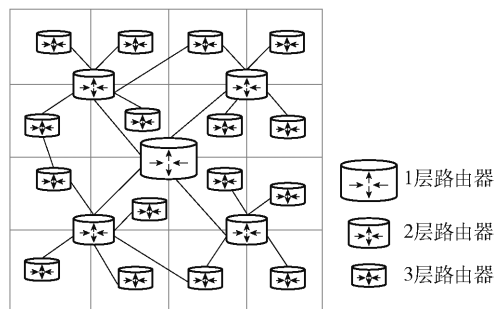


图8 1~3层路由器的示例拓扑

首先对路由学习期间每一层路由器的表项数目进行分析,可知理想状态下每一层路由器的表项数都为4.周期性发送目标为整个区域的兴趣包进行路由学习,将定时器设置足够大,以保证数据包能够返回.随着学习次数的增加,在 $p=0.1$, $p=0.2$, $p=0.3$ 的情况下,统计表项的平均数目如图9所示.

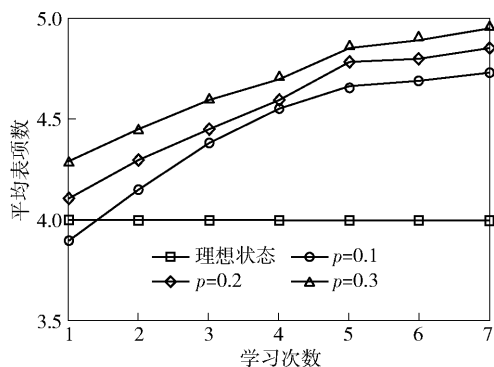


图9 每层路由器的平均表项数

从图9可知,在路由器节点间增加不同程度连接的情况下,路由表项数呈现增长态势,并且增幅很小,增长到一定程度后趋于平缓.由于网络拓扑采用类似四分树的结构,路由表平均表项数小于5.

在查表转发期间随机选择大小不同的区域作为兴趣包的目标区域,计算消费者和生产者两端的通信效率,有 a =所有消费者收到的数据包数/所有消费者发送的兴趣包数, b =所有生产者收到的数据包数/所有生产者发送的兴趣包数.其中 b 为考虑了兴趣包复制后网络的通信效率.改变消费者的数

量,通信效率如图10和图11所示.

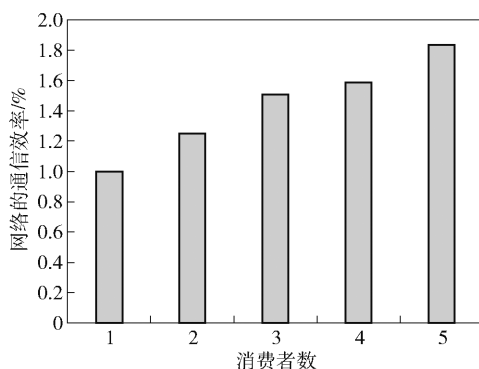


图10 消费者和生产者两端的通信效率

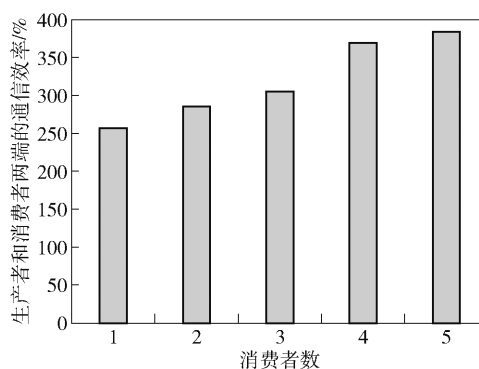


图11 网络的通信效率

从图11中可见,随着消费者数量的逐渐增加,兴趣包所请求的区域有所重叠,消费者发送的兴趣包以及生产者收到的兴趣包数都会减少, a 和 b 的比例就会随之增加.消费者和生产者两端的通信效率和网络的通信效率均有提高.

5 结束语

为了满足与地理位置有关的多源数据请求,设计了基于NDN地理位置标识的生成机制;提出基于自学习的路由生成和转发机制,实现了面向地理位置的多源信息采集.后续研究中拟设计更为高效的查表机制,提高转发速率并改进自学习机制,以生成多条转发路径,从而有效应对链路故障和节点失效,提高网络的鲁棒性.

参考文献:

- [1] 刘胜超. 位置服务的研究与发展[J]. 卫星应用, 2015, 2: 16-23.
Liu Shengchao. Research and development of location based service[J]. Satellite Application, 2015, 2: 16-23.

- [2] Kai R, Koizumi Y, Hasegawa T. Name-based geographical routing/forwarding support for location-based IoT services[C]//2016 IEEE 24th International Conference on Network Protocols (ICNP). Singapore: IEEE, 2016: 1-6.
- [3] Amadeo M, Campolo C, Molinaro A. Multi-source data retrieval in IoT via named data networking[C]//Proceedings of the 1st ACM Conference on Information-Centric Networking. Chicago: ACM-ICN, 2014: 67-76.
- [4] 董芳. 基于地球剖分的网络地理编码模型与应用研究[D]. 北京: 北京大学, 2013.
- [5] 周洋. IP组播的应用研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2005.
- [6] Tortelli M, Grieco L A, Boggia G, et al. Cobra: lean intra-domain routing in NDN[C]//2014 IEEE 11th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC). Las Vegas: IEEE, 2014: 839-844.
- [7] 葛国栋, 郭云飞, 刘彩霞, 等. 命名数据网络中基于局部请求相似性的协作缓存路由机制[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(2): 435-442.
Ge Guodong, Guo Yunfei, Liu Caixia, et al. Collaborative caching and routing scheme based on local request similarity in named data networking[J]. Journal of Electronics and Information, 2015, 37(2): 435-442.
- [8] 张岩, 黄韬, 刘江, 等. 基于内容轨迹的内容中心网络多径路由策略[J]. 北京邮电大学学报, 2014, 37(3): 98-103.
Zhang Yan, Huang Tao, Liu Jiang, et al. Content trace based multi-path routing scheme in content centric networking[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014, 37(3): 98-103.
- [9] Yuan H, Song T, Patrick C. Scalable NDN forwarding: concepts, issues and principles[C]//2012 21st International Conference on Computer Communications and Networks. Munich: IEEE, 2012: 1-9.
- [10] Grassi G, Pesavento D, Pau G, et al. Navigo: interest forwarding by geolocations in vehicular named data networking[C]//2015 IEEE 16th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). Boston: IEEE, 2015: 1-10.
- [11] Shi Junxiao, Newberry E, Zhang Beichuan, et al. On broadcast-based self-learning in named data networking[C]//2017 IFIP Networking Conference (IFIP Networking) and Workshops. Stockholm: IEEE, 2017: 1-9.
- [12] 陈鑫. NDN中基于汇聚点的缓存与转发研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2018.
- [13] Mastorakis S, Afanasyev A, Zhang Lixia. On the evolution of ndnSIM: an open-source simulator for NDN experimentation[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2017, 47(3): 19-33.