

信息中心网络元模块承载的差异化服务模型

田铭* 邬江兴 兰巨龙 马腾
(国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450002)

摘要: 针对信息中心网络提供面向业务类型的差异化服务的问题, 该文提出一种元模块承载的差异化服务模型(DSM³)。DSM³定义了基础网络控制功能单元——元模块, 通过匹配不同的元模块组合串实例来承载不同特征需求的业务类型; 并将元模块组合过程视为“业务策略→实例组合串→业务承载路径”的二级映射问题, 重点设计了针对实时业务、非实时流媒体业务和用户自产生业务的路由计算类元模块实例。仿真表明, DSM³通过少量额外控制开销, 降低了上述3种业务的平均响应时延, 提高了网络节点缓存命中率, 实现了对于差异化服务需求的支持。

关键词: 信息中心网络; 多样化业务; 区分服务; 元模块

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)11-2940-08

DOI: 10.11999/JEIT160105

Differentiated Service Model Based on Meta Module in Information Centric Networking

TIAN Ming WU Jiangxing LAN Julong MA Teng

(National Digital Switching System Engineering Technological R&D Center, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to provide differentiated services in information centric networking, a Differentiated Service Model based on Meta Module (DSM³) is proposed. DSM³ defines the basic network control unit as “meta module”, and matches different meta module combination cases to carry different business with various demand characteristics. The meta module combination process is deduced as the secondary mapping problem of business policy → case combination strings → business path. Then, the meta module cases of route calculation for real-time service, non-real time streaming media and user generated content are designed. Simulation results show that through a small amount of additional control overhead, DSM³ reduces the average response delay of the three kinds of business above, improves the network average cache hit rate, and supports differentiated services.

Key words: Information-centric networking; Diverse business; Differentiated service; Meta module

1 引言

随着互联网技术的飞速发展, 网络应用的主体逐步向内容获取和信息服务演进。人们对于数据应用的需求日益增长, 以信息为中心的网络(Information-Centric Networking, ICN)^[1,2]应运而生, 它采用从网络底层全新设计的理念, 通过在分组的网络层头部中定义载荷内容的标识对内容进行命名, 取代了传统网络体系中命名主机(IP 地址)的

机制。然而, 命名数据网络 NDN^[3]作为典型的信息中心网络体系结构范例, 其最初设计缺乏对业务特征的考虑, 难以保证业务的差异化服务需求, 具体表现为:

(1)内容传输时, 采用机械式地逐包请求方式, 对于即时推送类的业务, 请求者需要预先发送兴趣请求, 否则内容产生后无法及时传送给请求者; 对于实时流媒体等业务, 由于NDN的数据分块机制, 需要逐一发送多个兴趣请求, 大量的兴趣报文浪费了上行链路带宽。

(2)缓存决策时, 缺乏对于业务类型的考虑, 将所有应答内容盲目不加区分地进行缓存^[4]。事实上, 对于私有性强的实时业务类型, 其内容共享度极低, 盲目缓存不但浪费了节点有限的CS存储资源, 请求响应时的CS查表操作还增加了报文的处理时延; 而对于共享度较高的流媒体业务和用户自产生业务, CE²的缓存方式又导致大量的同质内容冗余。

收稿日期: 2016-01-21; 改回日期: 2016-05-30; 网络出版: 2016-09-08

*通信作者: 田铭 tianming19841101@126.com

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金(2012CB315901, 2013CB329104), 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金(2015AA016102), 国家自然科学基金(61309019, 61372121)

Foundation Items: The National 973 Program of China (2012CB315901, 2013CB329104), The National 863 Program of China (2015AA016102), The National Natural Science Foundation of China (61309019, 61372121)

(3)路由转发时, NDN 中常用的策略是全转发、随机转发和最短路径转发策略^[5]。对于全转发策略, 兴趣包和数据包成倍增长, 产生大量的冗余流量; 随机转发策略无法探测路径长度和路径时延, 性能无法保证; 最短路径转发策略, 只是将兴趣包转发到跳数最少的内容源, 未考虑业务的特征需求, 无法提供服务质量保证。对于传输路径外的节点存储资源, 也得不到有效的利用。

目前 NDN 对于如何保证多样化业务的服务需求这一内容传输问题并没有给出系统的成熟的解决方案。文献[6, 7]分析了 ICN 支持多媒体业务传输的优势和不足, 对于现有方案进行了对比分析, 指出了目前存在的问题和下一步研究方向。文献[8]依据可靠性和实时性指标, 将内容划分为不同业务类型, 设计了差异化的内容请求模式。但是该方案缺乏对于缓存决策和路由算法的考虑, 且只给出了理论分析, 缺乏实验验证。文献[9]将业务划分为实时业务和非实时业务; 针对实时业务, 采用一对多(one-request-n-packets)的请求方式(MERTS), 通过发送特殊兴趣包(Special Interest, SI)完成 n 个数据单元的同时请求。但是, 该方案对于实时业务采用的仍旧是 CE² 的泛滥式缓存方式; 文献[10]提出了一种支持快速和正常转发的双模式传输策略(Dual-Mode)。对于共享内容, 采用 CCN 原有的缓存和请求模式, 对于私有内容, 直接依据 FIB 实现快速的路由转发, 加快报文处理速度。文献[11]提出了一种视频会议的实现方式, 使用户在 NDN 架构下获得与 Skype 或者 Google Hangouts 相同的用户体验, 作者侧重点是系统设计与实现, 并未考虑 NDN 的缓存与转发模式与实时业务需求的匹配程度。文献[12]综合考虑收敛时间和算法的精确性, 提出基于分布均匀度的蚁群路由策略, 降低了内容请求的平均时延, 平衡了网络负载。文献[13]提出了蚁群优化算法的改进策略, 包括利用弧相容预处理方式压缩搜索空间; 提出算法参数的设置方案, 提高算法求解效率和适应性。文献[14]提出了基于业务类型的多样化内容分发机制 DCDS, 针对 3 种业务制定了差异化的内容请求和缓存方式, 该方案在缓存命中率和平均请求时延方面性能优于已有算法, 但方案未考虑差异化路由对多样化业务的影响, 且未给出一种普适性的差异化内容分发模型。

针对上述不足, 本文认为研究业务请求特征驱动的差异化内容分发策略, 需要在缓存、路由和内容请求的层面, 设计和实现内容传递对业务类型的匹配和差异化服务, 提升网络整体的服务效率和质量。为此, 提出 ICN 中元模块承载的差异化服务模

型(Differentiated Service Model based on Meta Module, DSM³)。本文借鉴可重构网络元能力^[15]概念, 将参与内容请求与数据转发的基础网络控制功能分解为细粒度的模块单元——元模块, 并将基础网络控制功能元模块分为 4 种类型, 包括内容请求类、内容查找类、路由计算类、数据缓存类。针对不同特征需求的业务类型, 匹配不同的元模块组合链实例来承载, 提供差异化服务。

2 元模块

元模块作为基础网络控制功能单元, 提供 4 种类型基础服务, 具体包括: 内容请求、内容查找、路由计算、数据缓存, 再对每类功能进行功能分解, 得到细粒度的元模块集合, 记为 C , 包括逐一内容请求、相关并行预测请求、持久兴趣请求、渐进式缓存、边缘缓存、不缓存、捷径路由、循迹路由、蚁群路由等。该集合是封闭的且元素有限。元模块的引入, 可以对集合中元模块进行动态组合以实现多种业务类型的区分式服务, 向集合中添加新型的元模块以实现网络功能的快速扩展, 增强新型业务的个性化支持能力。

元模块实例是开发者开发并已应用在网络的元模块。在 NDN 网络中, 采用普遍缓存、逐一请求模式、CS-PIT-FIB 的查表顺序、以及传统路由算法这些元模块实例组合运行, 实现 NDN 网络的内容请求与数据传输。元模块之间通过模块组合串联起来。对于某种业务策略中的模块组合串, 需要为每一个元模块选取一个元模块实例来执行相应的功能, 如 $m \mapsto e$ 表示 e 是元模块 m 的一个实例。记实例化后的模块组合串为实例组合串 E 。将执行同一业务策略的实例组合串的所有节点进行连接, 形成内容请求节点到内容源节点的转发传输路径, 称作业务承载路径。比如 $E \Rightarrow p$ 表示 p 是实例组合串 E 所在的节点。

定义 1 元模块组合问题 给定业务策略、网络拓扑且满足节点连通的前提下, 从网络节点中选取能执行模块组合串 E 的节点并生成一条从源节点到目的节点的执行路径。

元模块组合过程可视为“业务策略→实例组合串→业务承载路径”的二级映射问题, 即“业务策略→实例组合串”映射和“实例组合串→业务承载路径”映射。图 1 为二级映射过程示意图, 将某种特定业务所需策略 P , 映射为元模块实例组合串 E_C , 其中不同形状 e_i 分别代表 4 种不同的元模块, 然后, 将执行同一业务策略 P 的实例组合串 E_C 所在节点进行连接, 形成执行路径 N_C 。

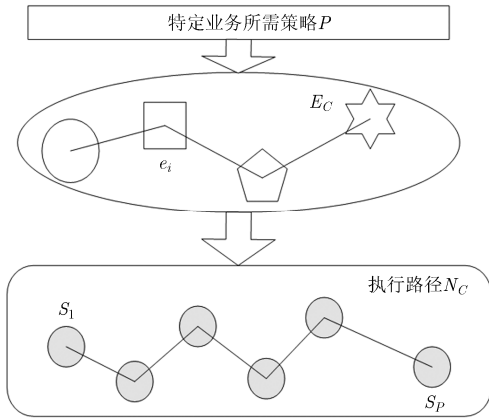


图 1 基于元模块的二级映射问题

3 二级映射

3.1 “业务策略→实例组合串”映射

定义 2 “业务策略→实例组合串(Service Policy-Instance Combination String, SP-ICS)”映射 指以业务策略的元模块集为模块组合串, 以需求集为约束, 选取每种特定的元模块实例, 组成实例组合串。映射过程记为 $f: P \rightarrow E_C$, 其中 $P = \{ \langle S^P, M^P \rangle | S^P \subseteq S, M^P \subseteq M \}$, $E_C \subseteq E$ 。

“SP-ICS”映射问题, 即元模块组合优化问题, 通过选取合适的元模块实例, 最大化实例组合串的效用, 使网络提供面向多种业务类型的差异化区分承载服务。具体的业务类型划分不在本文的讨论范围之内, 本文借鉴文献[14]中对典型业务的定义, 详细讨论 3 种业务:

(1)实时业务: 内容后续共享程度小, 私有性强, 对于请求时延要求严格;

(2)非实时的流媒体业务: 后续共享程度高, 连续内容请求之间具有强相关性, 对于带宽资源要求大;

(3)用户自产生内容: 业务内容文件小, 内容数量大, 对于时延和带宽没有明显要求。

为实现对业务类型的区分和查询匹配, 在 CCN 原有兴趣包和数据包中添加业务类型(Type of Service, ToS)字段, 为实现后续业务类型扩展功能, 该字段定义为 8 bit; 另外, 添加报文类型(Type of Packet, ToP)字段, 用于标识不同业务的请求和应答报文。后续参与转发的沿途节点依据 ToS 和 ToP 字段取值, 执行“SP-ICS”映射, 通过实例组合串的动态组合, 实现面向多种业务类型的差异化区分承载。

详细的映射方式需要具体分析每种业务特点, 制定针对每种业务类型的映射策略。为验证 DSM³模型的性能, 这里给出上述 3 种典型业务的元模块

承载实例组合串, 并就这 3 种业务的性能和其它实例化的方案(如 CCN^[3], DCDS^[14]等)作比较。实例组合串如图 2 所示, 针对非实时流媒体业务, 采用“相关预测请求-循迹路由-CS→PIT→DTT(循迹路由表)→FIB 的查表顺序-边缘式缓存”的元模块实例组合串方式; 针对实时业务, 采用“持久兴趣请求-蚁群路由-PIT→ART(蚁群路由表)→FIB 查表顺序-不缓存”的实例组合串方式; 针对用户自产生业务, 采用“逐一内容请求-捷径路由-CS→PIT→SRT(捷径路由表)→FIB 的查表顺序-渐进式缓存”的实例组合串方式。

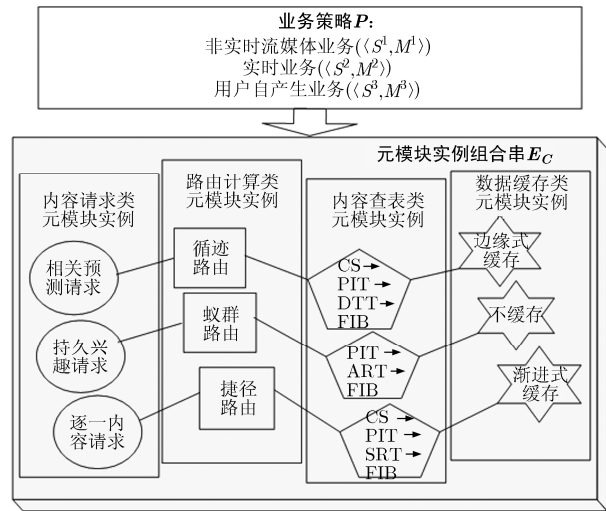


图 2 “业务策略→实例组合串”映射

就元模块实例的实现细节而言, 内容请求类和数据缓存类元模块实例的实现细节由文献[14]中的算法给出, 这里不再赘述。路由计算类的元模块实例针对 3 种业务分别给出, 下节详细讨论。内容查表类的元模块实例由路由计算类元模块实例得出的存储数据结构延伸而来。

3.2 “实例组合串→业务承载路径”映射

定义 3 “实例组合串→业务承载路径(Instance Combination String-Service Carrying Path, ICS-SCP)”映射 针对网络拓扑, 将执行同一业务策略的实例组合串所在节点进行连接, 形成一条物理层面的端到端数据传输通路。映射过程记为: $g: E_C \rightarrow N_C$, 其中 $N_C \subseteq N$ 。

ICS-SCP 映射本质上是多态路由^[16]问题, 即由基本路由功能派生出功能特定或服务特定等多模态特性的多态路由机制, 是基于多样化应用的业务特征要求和网络动态行为驱动构建的, 基于基态路由模型进行实例特化以满足具体应用所需的各种约束属性服务路径的路由机制。基态路由的建立和

派生过程在文献[16]中已有讨论，这里不再详细介绍，具体的业务承载路由由下述针对性的路由算法实例给出。

3.2.1 支持非实时流媒体业务的循迹路由算法 流媒体业务内容共享度高，可以被后续请求反复利用，缓存策略已将该类业务内容以概率方式推送至网络边缘存储，相应的路由策略需充分发现网络边缘节点缓存的内容数据块，利用循迹路由对内容请求进行响应，减少核心网络和内容源服务器的负载压力。增加数据包轨迹表(Data Trace Table, DTT)这种新的数据结构来引导请求向其它边缘节点路由，充分利用转发过的数据包历史信息。每个 DTT 条目包含 4 个表项：Name(命名内容的前缀)；To(转发的数据包的去向端口，也作为后续相同内容请求的转发端口)；From(数据包的来向，用于撤销无效路由时的端口比对和路由回溯)；Lifetime(该条目的生存时间)。

如图 3 所示，在 C 向内容服务器请求过数据之后，根据缓存策略将之存储在路由器 C 的 CS 中，之后 D 也请求该数据。依照原有路由规则，因为 B 本地未存储数据包副本，只能将兴趣包沿路径 1 路由。然而引入数据包循迹路由策略后，每个节点都保留了已转发过的数据信息，B 可将该请求沿路径 2 转发至 C 处。为防止缓存替换引起的缓存命中失效，在 DTT 表项中引入生存时间参数，超过生存时间的数据包轨迹将不再保留。

3.2.2 支持实时业务的改进蚁群路由算法 实时业务如即时产生业务、实时流媒体业务、实时会话业务等，私有性强，一般有多种服务质量需求。满足多约束参数的服务路径建立问题，属于 NP-完全问题^[17]，可利用分布式的启发式算法寻求最优解。蚁群优化算法(Ant Colony Optimization, ACO)^[18]采用了正反馈原理，加快了进化过程，并且蚂蚁个体之间不断进行信息交互，具有很强的并行性，不断地探索解空间，从而利于较快发现更优解。然而，

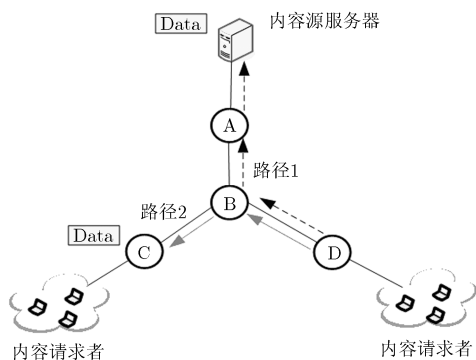


图3 支持非实时流媒体业务的循迹路由机制示意图

蚁群算法容易出现运算初期收敛速度慢和搜索到一定程度后产生停滞现象，本文将文献中的 RED-ACO^[12]算法加以引进，以提高算法收敛速度和精度。

引入蚁群路由算法后，ICN 节点在原有的 FIB 之外，增加了 RED-ACO 信息素表，记录内容对应的转发接口的信息素值和相应的转发概率。对于每个内容条目，运行 RED-ACO 算法计算每个接口的信息素值，然后根据信息素值更新对应的接口转发概率，最后对比转发概率最高的接口就作为 FIB 表中的转发下一跳。

3.2.3 支持用户自产生业务的捷径路由算法 用户自产生内容共享程度参差不齐，内容请求在空间分布上具有一定程度的局域相似性(locality)^[19]，在内容请求时，处于邻近区域的用户更倾向于关注相同的内容。基于此，提出信息中心网络支持用户自产生业务的捷径路由算法，其主要思路是：利用用户兴趣的局域相似性，建立兴趣社区，通过导向性的缓存副本通告，以较小的通信代价实现捷径路由。兴趣社区构建和社区内缓存副本通告过程在文献[20]中已给出，捷径路由建立过程如下：

节点 j 在收到其所在社区关于内容 C 的通告报文后，提取内容名字 C 、到达接口 $Face$ 和到达此副本的代价 C_C ，据此计算捷径路由，步骤如下：

步骤 1 判断捷径路由的代价是否最优。如果 $C_C > C_S$ (C_S 为 FIB 中到内容源服务器的代价)，则该捷径路由代价太高，删除该条目；否则在捷径路由表中创建到达内容 C 的路由条目，代价为 C_C 。

步骤 2 若内容 C 存在多个捷径路由转发 $Face$ 时，则 $C_C = \text{Min}_i C_C(i)$ ，其中代价最小的接口作为下一跳，并创建捷径路由表条目。

4 理论分析

4.1 通信服务质量分析

本文主要从引入 DSM³ 后与 CCN 的时延性能对比分析，内容响应时延主要包括：节点排队时延 t_q 、传播时延 t_p 和传输时延 t_c 。假设业务类型为 S 种，每种类型的业务请求个数为 $N_i (i=1,2,\dots,S)$ ，第 i 类业务有 j 个请求响应跳数为 $H_{ij} (i=1,2,\dots,S, 1 \leq j \leq N_i)$ ，则在 CCN 中的总体访问时延为

$$D = \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^{N_i} (t_q + t_p + t_c) \cdot H_{ij} \quad (1)$$

其中，每个节点的传播时延和传输时延是固定的，总体时延值与请求响应跳数相关；节点排队时延主要与查表搜索时延有关，具体地与路由查表算法有关，本质上是表项长度 L 的正比函数 ($t_q \propto L$)。

DSM³针对不同业务查询不同的数据存储表, 设查询 CS, PIT 和 FIB 表项的时延分别为 t_{CS} , t_{PI} , t_{FI} , 查询蚁群路由表 ART, 循迹路由表 DTT, 捷径路由表 SRT 的时延分别为 t_{AR} , t_{DT} , t_{SR} , 则 DSM³ 改善的时延性能为

$$\Delta D = \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^{N_i} [(t_{CS} + t_{PI} + t_{FI} + t_P + t_C) \cdot H_{ij}] - \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^{N_i} (t_{q_i} + t_P + t_C) \cdot H_{ij} \quad (2)$$

其中, $t_{q_1} = t_{PI} + t_{AR} + t_{FI}$, $t_{q_2} = t_{CS} + t_{PI} + t_{DT} + t_{FI}$, $t_{q_3} = t_{CS} + t_{PI} + t_{SR} + t_{FI}$ 。 H_{ij} 的改善与具体的缓存算法有关, DSM³ 将流媒体业务内容推送至网络边缘缓存, 增大了该类业务的就近响应概率, 并将自产生业务按概率渐进缓存, 实现了内容的有序分布, 提高了网络缓存的整体利用率。

4.2 资源占用分析

报文头部控制开销 设信息中心网络支持的业务类型为 S 种, 每种业务类型对应的报文种类为 $M_i (i=1, 2, \dots, S)$, 则支持元模块承载的差异化服务需付出的额外报文头部开销为(单位 bit)

$$C_p = \log_2 S + \log_2 (\text{Max} M_i) \quad (3)$$

缓存通告开销 引入兴趣社区构建和相似性报文通告的额外开销。定义为缓存通告报文 CAP 与其传输距离的乘积, 大小取决于通告报文长度、通告频率和路由传输跳数(单位 bit · hop)。

$$C_A = f_{CAP} \cdot \sum (S_{CAP}^1 \cdot d_1 + S_{CAP}^2 \cdot d_2 + \dots + S_{CAP}^{\max} \cdot d_{\max}) \quad (4)$$

其中, f_{CAP} 为 CAP 报文通告频率, \max 表示兴趣相似性社区的最大规模。 S_{CAP}^i 表示兴趣相似性社区 i 中缓存通告消息长度, d_i 为通告跳数。

内容请求开销 为支持 DSM³ 模型及相应元模块实例的运行, 引入与 DCDS 类似的持久兴趣包 PIP、更新兴趣包 UIP 和注销兴趣包 UsIP, 这部分额外控制开销是为了大幅降低实时业务兴趣报文的; 蚂蚁兴趣包和数据包是探测最优路径引入的额外控制开销;

$$C_R = f_{ANT} \cdot (S_{ANT,Int} + S_{ANT,Dat}) \cdot d_{ANT} + (f_{UIP} \cdot S_{UIP} + S_{PIP} + S_{USIP}) \cdot d \quad (5)$$

其中, f_{ANT} 为发送蚂蚁报文的频率, $S_{ANT,Int}$, $S_{ANT,Dat}$ 分别表示蚂蚁兴趣包和蚂蚁数据包的报文长度, d_{ANT} 为蚂蚁报文的传输距离。

节点存储开销 DSM³ 方案引入的额外存储开销包括: 蚁群路由计算过程中的状态信息表 ART; 循迹路由增加的循迹路由表 DTT; 捷径路由表 SRT。代价单位为 bit。

$$C_s = C_{ART} + C_{DTT} + C_{SRT} \quad (6)$$

$$C_{ART} = \sum_{i=1}^l \left\{ L_i^n + \left[\sum_{j=1}^m \left(L_{i,j}^f + \sum_{k=1}^n L_{i,j,k}^p \right) \right] \right\} \quad (7)$$

$$C_{DTT} = \sum_{i=1}^w L_i^n + \sum_{j=1}^u L_j^f + \sum_{k=1}^v L_k^l + \sum_{p=1}^x L_p^L \quad (8)$$

$$C_{SRT} = \sum_{i=1}^a L_i^n + \sum_{j=1}^b L_j^f + \sum_{k=1}^c L_k^c \quad (9)$$

其中, L^n, L^f, L^l, L^L 和 L^c 分别表示内容名字、接口信息、信息素值、生存时间和路由代价的字段长度, $l, m, n, w, u, v, x, a, b, c$ 分别为对应的存储数量。

4.3 计算复杂度分析

相比 CCN, DSM³ 中循迹路由未引入新的计算, 缓存内容通告过程不引入新的计算, 只有 RED-ACO 算法在时间复杂度和空间复杂度上都有多增长, 基本的蚁群算法时间复杂度为 $T(n) = O(Nc \cdot n^2 \cdot m)$, 其中 Nc 为迭代次数, n 为节点数目, m 为蚁群中蚂蚁数目。本文引进的蚁群优化算法有效降低了迭代次数。

空间开销用于蚁群信息素的存储和更新, 以及状态转移概率的存储, 空间复杂度为 $S(n) = O(n^2) + O(n \cdot m)$ 。因为改进蚁群路由是在原有 FIB 路由的基础上, 引入蚁群优化算法探测最优路由, 其计算过程可与数据转发同步进行, 在算法迭代计算完成后, 将最优转发接口写入 FIB, 故而改进蚁群路由算法的额外计算开销不会影响节点正常的线速转发。

5 仿真实验

由于 ndnSIM^[21] 工具提供了开放的源码和运行实例, 并实现了 CCN 的基本数据结构单元和路由转发流程, 本文采用该工具进行仿真。节点个数为 50, 连接概率为 0.3 的网络拓扑由 GT-ITM 下的 Locality 模型随机生成。在网络中分别设置 4 个与上述 3 种业务相关的内容服务器, 负责实时业务(业务 1)内容集的存储和数据产生, 另外两个服务器分别负责非实时流媒体(业务 2)和用户自产生内容(业务 3)类业务内容集的存储、数据发布和响应。为了模拟上述业务流, 将对速率有较高要求的实时业务由相应的内容服务器产生恒定数据流, 发送速率设为 γ kbps; 对于业务 2 请求, 将非实时流媒体内容设为 2000 个, 每个内容划分为 10 个 chunk, 大小设为 10 kbytes, 请求概率服从 Zipf 分布, 第 i 个内容的推送概率为: $p(i) = C / i^\alpha$, $C = \left(\sum 1 / i^\alpha \right)^{-1}$, $\alpha = 1.2$; 对于业务 3 请求, 将内容对象总数设为 8000 个, 每个内容只含有 1 个 chunk, 请求概率服从 Zipf

分布($\alpha=0.8$)。假设节点缓存容量一致, 设为 20 MB, 初始缓存状态为空。仿真时间设为 500 s, 内容请求到达速率 $\lambda=100$ 个/s, 采样周期 $T=5$ s。

5.1 性能分析

为了对 DSM³ 的性能进行评价, 我们选取 CCN^[3], MERTS^[10]和 DCDS^[15]算法进行对比分析。具体的评价指标和性能对比如下。

5.1.1 平均响应时延(Average Response Delay) 内容请求者发送 Interest Packet 到接收到 Data Packet 为止的时间间隔, 定义为平均响应延迟 ARD。图 4 分别给出了 $\gamma=800$ kbps, $\rho=0.90$ 和 $\gamma=1600$ kbps, $\rho=0.95$ 时, 各业务的 ARD 对比。对于业务 1 而言, CCN 算法对于所有业务内容不加区分地进行缓存, 浪费了实时业务的内容查找时间, 其 ARD 最大, DSM³ 算法对于实时业务内容的缓存和查找功能做了优化, 其 ARD 性能有所提高, 随着改进蚁群算法最优路径搜索的执行, 收敛后的算法性能进一步提升。对于业务 2 而言, 由于初始节点缓存为空, 随着 CCN 算法执行, 节点缓存内容响应率逐渐增加, ARD 逐渐减小; 随着发送速率增加, 节点缓存实时业务内容的比例增加, 使得业务 2 的缓存命中率降低, 故而 $\gamma=800$ kbps 的 ARD 性能优于 $\gamma=1600$ kbps 的性能; DSM³ 将业务 2 内容推送到网络边缘缓存, 故而随着缓存资源逐渐发挥作用, 加之循迹路由算法有效利用网络边缘缓存, 其 ARD 性能得到提升, 发送速率越高, 算法提升越明显。对于业务 3, CCN 算法性能与业务 2 类似, 比业务 1 的 ARD 性能有所提高; DSM³ 算法将业务 3 的内容缓存在网络核心节点, 捷径路由算法可有效利用附近兴趣社区的缓存资源, 有效降低了 ARD。

5.1.2 缓存命中率(Cache Hit Ratio, CHR) 兴趣请求由路由节点的缓存 CS 进行响应的概率, 定义为缓存命中率 CHR。网络中节点缓存内容响应兴趣包请求的概率越高, 平均响应时延也越小。图 5 分别

给出了 $\gamma=800$ kbps, $\rho_{cor}=0.90$ 时在仿真时间 500 s 内各节点(0~49)业务 2 和业务 3 的缓存命中率。CCN 算法中节点 CE² 缓存方式使内容重复冗余较大, 无论对于业务 2 还是业务 3, 节点缓存命中率普遍偏低; MERTS 机制将实时业务内容排除在缓存内容之外, 为其它两类业务留出了更多的缓存空间, 有效提升了缓存命中率; DCDS 算法将业务 2 和业务 3 在缓存存储位置上加以区分, 使业务 2 以更大概率缓存在网络边缘, 业务 3 缓存在网络核心, 使节点缓存资源的整体利用率得以提高; DSM³ 算法不仅使得缓存分布更为合理, 有效减小了重复的缓存冗余和内容频繁替换导致的缺失率, 还利用了不用的路由机制将缓存内容得以有效利用, 循迹路由增大了业务 2 的缓存命中率, 捷径路由增加了业务 3 的 CHR, 在 DCDS 的基础上各节点的命中率又得以进一步提升。

5.2 代价开销对比

表 1 给出了在仿真时间为 5 s, $\rho_{cor}=0.95$, γ 取值分别为 800 和 1600 kbps 时, 各方案对应的控制、存储和传输代价开销对比。CCN 算法采用逐一内容请求模式, 不引入额外的控制开销, $C_c=0$, 但其传输开销最大。DCDS 已在 MERTS 机制基础上通过有限的控制开销进一步大幅降低了传输开销, DSM³ 方案不仅增加了控制开销, 还引入了存储开销, 但其传输开销较 DCDS 有明显降低(约 33.5%)。

表 2 给出了业务 2, 业务 3 对应的 Zipf 分布指数 α 从 1.2 和 0.8 调整到 1.4 和 1.0 后, 对应的内容控制、存储和传输开销对比。当指数 α 增大后, 两种业务对应的内容请求分布更加集中, DSM³ 对应的内容请求开销 C_T 和控制开销 C_c 都得到不同程度减小。

6 结束语

本文从缓存、路由、请求应答模式 3 个方面分

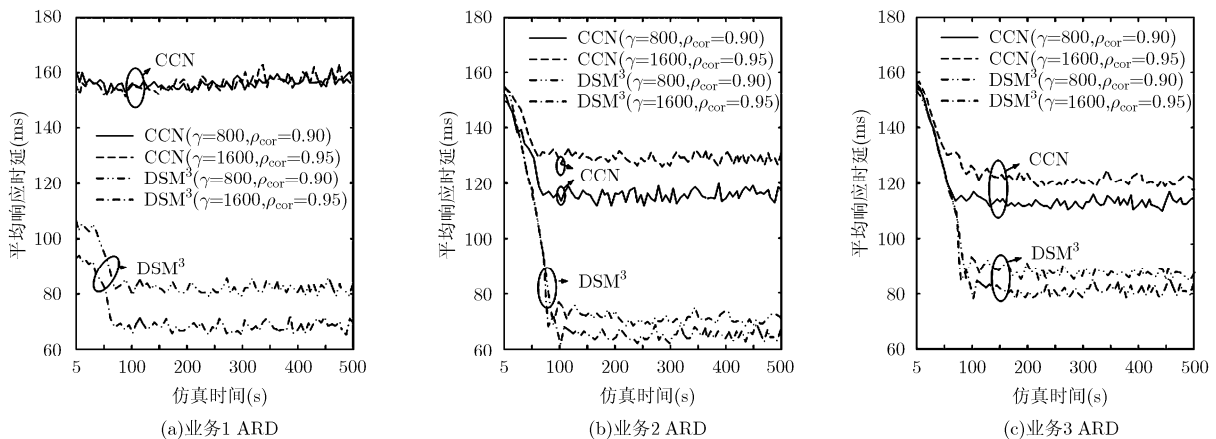


图 4 平均响应时延 ARD 对比

表1 代价开销对比(业务2: $\alpha=1.2$, 业务3: $\alpha=0.8$)

开销	$\gamma=800$ kbps				$\gamma=1600$ kbps			
	CCN	MERTS	DCDS	DSM ³	CCN	MERTS	DCDS	DSM ³
$C_C (10^3)$	0	617	1335	4892	0	650	1647	5611
$C_S (10^3)$	0	0	0	127	0	0	0	165
$C_T (10^6)$	34631	25539	16895	11234	46098	27161	17393	11830

表2 代价开销对比(业务2: $\alpha=1.4$, 业务3: $\alpha=1.0$)

开销	$\gamma=800$ kbps				$\gamma=1600$ kbps			
	CCN	MERTS	DCDS	DSM ³	CCN	MERTS	DCDS	DSM ³
$C_C (10^3)$	0	505	1035	4326	0	532	1121	4923
$C_S (10^3)$	0	0	0	122	0	0	0	159
$C_T (10^6)$	27943	20154	13545	9634	40138	21776	14319	10766

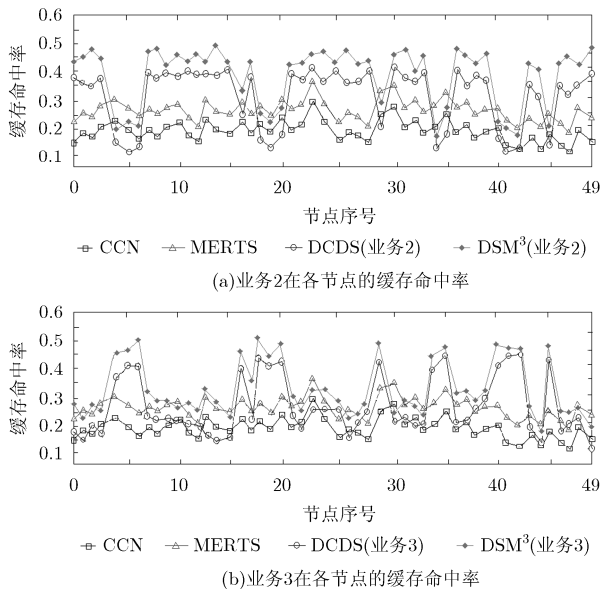


图5 单节点缓存命中率对比

析了 NDN 在支持多样化业务内容请求与传输方面的不足, 难以实现高效的内容分发, 提出了信息中心网络元模块承载的差异化服务模型(DSM³), 该模型通过匹配不同的元模块组合串实例来承载不同特征需求的业务类型; 并将元模块组合过程视为“业务策略→实例组合串→业务承载路径”的二级映射问题, 详细设计了路由计算类的元模块实例。仿真结果表明 DSM³ 方案以有限的控制和存储代价, 提高了缓存命中率, 降低了实时业务、非实时流媒体业务和用户自产生业务的平均响应时延。本文主要从差异化服务模型的设计和实现出发, 考虑信息中心网络对于多种业务的支持方式, 对于业务类型的划分不够详尽和具体, 对于支持每种特定业务类型的元模块实例也只是一种初步的设想和探讨, 下一步要针对每种业务类型设计更为科学合理的元模块实例。

参考文献

- [1] XYLOMENOS G, VERVERIDIS C N, SIRIS V A, *et al.* A survey of information-centric networking research[J]. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 2014, 16(2): 1024-1049. doi: 10.1109/SURV.2013.070813.00063.
- [2] THOMAS Y, XYLOMENOS G, TSILOPOULOS C, *et al.* Object-oriented packet caching for ICN[C]. Proceedings of ACM SIGCOMM Workshop on ICN, San Francisco, CA, USA, 2015: 89-97.
- [3] JACOBSON V, SMETTERS D K, THORNTON J D, *et al.* Networking named content[C]. Proceedings of CoNEXT, Rome, Italy, 2009: 1-12.
- [4] 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. doi: 10.11999/JEIT140246.
- [5] 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 & Information Technology*, 2015, 37(2): 435-442. doi: 10.11999/JEIT140246.
- [6] 葛国栋, 郭云飞, 刘彩霞, 等. CCN 中基于差异化缓存通告的混合路由机制[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(3): 700-707. doi: 10.11999/JEIT140527.
- [7] GE Guodong, GUO Yunfei, LIU Caixia, *et al.* A hybrid routing scheme based on differentiated cache advertisement in content centric networking[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(3): 700-707. doi: 10.11999/JEIT140527.
- [8] PIRO G, GRIECO L A, BOGGIA G, *et al.* Information-centric networking and multimedia services: present and future challenges[J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2014, 25(4): 392-406.
- [9] TSILOPOULOS C, XYLOMENOS G, and POLYZOS G C.

- Are information-centric networks video ready?[C]. IEEE International Packet Video Workshop, San Jose, CA, USA, 2013: 1–8.
- [8] CHRISTOS T and GEORGE X. Supporting diverse traffic types in information centric networks[C]. Proceedings of ACM SIGCOMM ICN Workshop on ICN, Toronto, Canada, 2011: 13–18.
- [9] LI H B, LI Y, and LIN T. MERTS: a more efficient real-time traffic support scheme for content centric networking[C]. IEEE International Computer Sciences and Convergence Information Technology, Seogwipo, Korea, 2011: 528–533.
- [10] RAVINDRAN R, WANG G, ZHANG X W, *et al.* Supporting dual-mode forwarding in content-centric network[C]. IEEE International conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems, Bangalore, India, 2012: 55–60.
- [11] GUSEV P and BURKE J. NDN-RTC: real-time video conferencing over named data networking[C]. ACM SIGCOMM Workshop on ICN, San Francisco, CA, USA, 2015: 117–126.
- [12] 张国印, 唐滨, 孙建国, 等. 面向内容中心网络基于分布均匀度的蚁群路由策略[J]. 通信学报, 2015, 36(5): 2015126-1–2015126-12. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2015126.
- ZHANG Guoyin, TANG Bin, SUN Jianguo, *et al.* Ant colony routing strategy based on distribution uniformity degree for content centric network[J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(5): 2015126-1–2015126-12. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2015126.
- [13] 张永刚, 张思博, 薛秋实. 求解约束满足问题的改进蚁群优化算法[J]. 通信学报, 2015, 36(5): 2015123-1–2015123-7. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2015123.
- ZHANG Yonggang, ZHANG Sibao, and XUE Qiushi. Improved ant colony optimization algorithm for solving constraint satisfaction problem[J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(5): 2015123-1–2015123-7. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2015123.
- [14] 葛国栋. 内容中心网络数据缓存与查找技术研究[D]. [博士学位论文], 解放军信息工程大学, 2014: 91–105.
- GE Guodong. Research on the technology of data caching and lookuping in content-centric networking[D]. [Ph.D. dissertation], The PLA Information Engineering University, 2014: 91–105.
- [15] 兰巨龙, 程东年, 胡宇翔. 可重构信息通信基础网络体系研究[J]. 通信学报, 2014, 35(1): 128–139.
- LAN Julong, CHENG Dongnian, and HU Yuxiang. Research on reconfigurable information communication basal network architecture[J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(1): 128–139.
- [16] 胡宇翔, 董芳, 王鹏, 等. 面向多样化服务定制的多态路由机制研究[J]. 通信学报, 2015, 36(7): 2015096-1–2015096-12. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2015096.
- HU Yuxiang, DONG Fang, WANG Peng, *et al.* Research on polymorphic routing mechanism for customized diversified services[J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(7): 2015096-1–2015096-12. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2015096.
- [17] WANG Zheng and CROWCROFT J. Quality of service routing for supporting multimedia application[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1996, 14(7): 1228–1234.
- [18] DORIGO M, MANIEZZO V, and COLORNI A. Ant system: Optimization by a colony cooperating agents[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part B: Cybernetics*, 1996, 26(1): 29–41.
- [19] ZHANG Y, ZHAO J, CAO G H, *et al.* On interest locality in content-based routing for large-scale MANETs[C]. IEEE 6th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor System, Macau, China, 2009: 178–187.
- [20] 杜传震, 兰巨龙, 田铭. 一种面向邻近缓存的引导式内容路由机制[J]. 电信科学, 2014(4): 46–53. doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.04.007.
- DU Chuazhen, LAN Julong, and TIAN Ming. A leading routing mechanism for neighbor content store[J]. *Telecommunications Science*, 2014(4): 46–53. doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.04.007.
- [21] AFANASYEV A, MOISEENKO I, and ZHANG L X. ndnSIM: NDN simulator for NS-3[R]. NDN, Technical Report NDN-0005, 2012.
- 田 铭: 女, 1984 年生, 助理工程师, 研究方向为新型网络体系结构、路由算法优化.
- 邬江兴: 男, 1953 年生, 教授, 中国工程院院士, 研究方向为程控交换、拟态计算与拟态安全.
- 兰巨龙: 男, 1962 年生, 教授, 研究方向为宽带信息网络、网络与信息安全.
- 马 腾: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为新型网络体系结构、算法优化.