

# 基于网络编码的命名数据网络研究

胡晓艳<sup>1,2,3</sup>, 郑少琦<sup>1,2,3</sup>, 龚俭<sup>1,2,3</sup>, 程光<sup>1,2,3</sup>, 臧小东<sup>1,2,3</sup>

(1. 东南大学网络空间安全学院, 江苏南京 211189;

2. 东南大学教育部计算机网络和信息集成重点实验室, 江苏南京 211189;

3. 东南大学江苏省计算机网络重点实验室, 江苏南京 211189)

**摘要:** 命名数据网络 (NDN) 支持网络缓存和多路径传输; 但由于节点间协调的复杂性, 二者未能充分结合以发挥 NDN 高效传输内容的潜力。网络编码 (NC) 允许网络节点对多个报文再编码, 由此产生的随机性使得网络可从多数据源并行传输数据, 简化节点间协调。本文提出基于网络编码的 NC-NDN 系统模型, 通过设计具体的报文格式, 报文的转发处理流程以及缓存替换策略以充分发挥 NDN 网络缓存和多路径传输的优势。实验结果表明, NC-NDN 系统可提高网络传输数据内容的性能。

**关键词:** 网络编码; 命名数据网络; 网络缓存; 多源传输

中图分类号:

文献标识码: A

doi:

## Named Data Networking with built-in Network Coding

HU Xiao-yan<sup>1,2,3</sup>, ZHENG Shao-qi<sup>1,2,3</sup>, GONG Jian<sup>1,2,3</sup>, CHENG Guang<sup>1,2,3</sup>, ZANG Xiao-dong<sup>1,2,3</sup>

1. School of Cyber Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China

2. Key Laboratory of Computer Network and Information Integration of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 211189, China

3. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Computer Network Technology, Southeast University, Nanjing 211189, China

**Abstract:** Named Data Networking (NDN) intrinsically supports in-network caching and multi-path transmission. However, due to the required complicate coordination among network nodes, in-network caching and multi-path transmission are difficult to be combined together to achieve efficient content transmission. Network coding (NC) allows nodes to encode messages and the resulting randomness enables parallel multisource content delivery without requiring sophisticated coordination among network nodes. This work proposed an NC-NDN model that builds network coding in NDN. By tailoring the packet formats, packet process logic, and cache maintenance at network nodes, the advantages of in-network caching and multi-path transmission are effectively exploited. The experimental results validate that the NC-NDN system can improve the performance of content delivery.

**Key words:** Network Coding, Named Data Networking, in-network caching, multisource transmission

## 1 引言

为了满足互联网用户日益增长的数据内容传输的需求, 研究人员提出了下一代互联网体系结构信息中心网络 (ICN, Information Centric Net-

working) [1]。作为当前最有前景的 ICN 体系结构, 命名数据网络 (NDN, Named Data Networking) [2] 关注数据内容本身, 使用层次结构的名称标识和路由报文。在 NDN 中, 用户发送 Interest 报文来请求数据内容, 具有匹配名字的 Data 报文

收稿日期: 2018-00-00; 修回日期: 2018-00-00

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61602114), 赛尔网络下一代互联网技术创新项目 (No. NGII20170406), 国家重点研发计划 (No. 2017YFB0801703)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China under Grant (No. 61602114); CERNET Innovation Project under Grant (No. NGII20170406); Key Research and Development Program of China under Grant (No. 2017YFB0801703)

响应 Interest 报文的请求。

NDN 很重要的一个特点就是支持网络缓存，网络节点的 ContentStore 成为除原始数据源之外的额外数据源；此外，NDN 天然地支持报文的多路径转发。这两个特点一起为 NDN 实现多数据源的并行数据内容传输提供了可能，但这需要网络节点间的复杂协调。具体地说，为了实现多数据源的并行传输，网络节点需要知道每条路径所能提供的具体数据内容。因此，为了使用缓存的内容，其可达性必须在路由系统中通告。而 NDN 中用户获取内容的路径是动态变化的，内容的缓存是机会式且高度动态变化的，也就是说路由系统需要以数据报文的粒度实时更新缓存内容的可达性信息，这对缓存系统的可扩展性提出了巨大挑战。因此，当前 NDN 的网络缓存和多路径传输尚未充分结合以实现高效的内容传输，只是将同一 Interest 报文向所有可能的路径转发（多条路径返回和缓存相同的 Data 报文，的确提高了内容获取的健硕性，但多路径传输的收益减小了）[3]，或选择历史记录的性能最好的路径转发[4]，或随机地选择一条路径转发[5][6]，这些最终实现都只是单路径内容传输。

基于以上问题，有学者提出利用网络编码（NC）来提升 NDN 的网络传输效率。在 NC 环境下，网络节点对报文进行编码操作，用户不再请求特定的数据块，而是请求特定数据内容段中任一编码块；只要从网络中收到足够的线性无关编码块（与编码块获取的路径无关），用户即可解码出原始内容。也就是说，网络节点并不需要知道每条路径所提供的具体的每个数据内容，只需要知道每条路径是否能够提供用户所请求特定数据内容段中的编码块即可。因此，利用 NC，可以在大大简化网络节点间协调的情况下，实现网络从多数据源并行传输数据内容。

当前已有部分研究专注于将 NC 引入 NDN。这些研究更多的是关注于将 NC 作为 NDN 的一个拓展功能，并未发掘将 NC 与 NDN 体系架构完全融合所带来的优势。因此，本文提出融合 NC 和 NDN 的 NC-NDN 系统模型，将 NC 融入 NDN 的各个环节。该系统在 NDN 的基础上主要进行了以下改进：

(1) 修改了报文中内容名称的语义，使其只有请求的数据内容段的内容名称。

(2) 在 Interest 报文中添加 Expect Rank 字段，节点依据该字段判断其拥有的编码块与请求者已有的编码块是否是线性无关的，即节点是否满足响应 Interest 报文的条件。同时也在 Interest 报文中添加 RID 字段，节点依据以上两字段判断 Interest 报文是否可以聚合。

(3) 制定了完整的 Interest 报文和 Data 报文处理流程。

(4) 调整了 ContentStore 的存储结构，制定了网络编码环境下的缓存替换策略。

接下来，本文的第二部分调研了相关领域的研究现状。在第三部分介绍了 NC-NDN 系统的详细设计，并在第四部分对 NC-NDN 的传输效率进行评估，第五部分则是对本文工作的总结。

## 2 相关工作

Montpetit 等人首次提出了网络编码应用于信息中心网络（ICN）的观点，认为网络编码能提升 ICN 的网络性能[7]。自此之后，越来越多的学者开始研究网络编码在 ICN 中的应用。例如，Wu 等人提出了基于网络编码的内容中心网络（CCN）缓存技术[8]，该论文提出的 CodingCache 技术允许中间阶段对数据块进行编码形成新的编码数据块并缓存该编码块。在文献[9]中，Wu 等人通过基于真实拓扑和视频访问日志数据集的实验来评估 CodingCache。结果表明，CodingCache 能够提高缓存命中率，同时还可以改善网络中缓存的使用。ZHAO 等人提出了兴趣流（Interest Flow）的概念[10]，将同一个内容文件的多个内容块视为一个流，兴趣流允许一个流 Interest 报文请求多个 Data 报文，同时将网络编码与网络内缓存结合实现多路径传输。

Matsuzono 等人提出了一种网络编码机制 L4C2[11]，用于通过 CCN 实现低延迟，低损耗的视频流。在 L4C2 中，消费者首先请求非网络编码的数据包，并且仅在检测到数据包丢失时请求网络编码的数据包。Nguyen 等人则提出一种网络编码模式下 CCN 中 Interest 报文的聚合方式[12]。该方式对编码系数矩阵秩的大小进行比较，通过修改 PIT 表结构实现路由节点对 Interest 报文的聚合。Liu 等人则提出了一种新的基于特定请求的编码方案[13]，并制定了相应的转发策略，使得用户可以从多个节点同时获得线性无关编码块。

以上研究主要专注于在 ICN 传输中的某一环节引入网络编码，除此之外，也有越来越多的学者开始研究将网络编码引入整个 ICN 体系架构，充分发挥网络编码的优势。例如 Saltarin 等人提出了较完整的结合网络编码的 NetCodCCN 模型 [14]。作者介绍了引入网络编码的 CCN 的内容命名机制以及 Interest 报文聚合机制，并阐述了 Interest 报文和 Data 包在网络编码环境下的处理流程。虽然 NetCodCCN 通过实验证明了该模型可提升 CCN 的鲁棒性以及网络资源的利用率，但是作者并未对网络编码环境下的缓存组织和替换策略进行优化。

本文在已有研究的基础上提出的 NC-NDN 模型，不仅设计了完整的报文格式适应网络编码环境下的语义要求，而且制定了 Interest 报文和 Data 报文处理流程，并优化了网络编码环境下的缓存替换策略。

### 3 NC-NDN 系统模型

#### 3.1 NC-NDN 报文格式

##### 3.1.1 Interest 报文格式

网络编码环境下的 Interest 报文不再是原始的 NDN 中请求特定的数据块，而是请求同属特定数据内容段的某一编码块，称特定数据内容段为一个 generation。当请求者得到属于同一 generation 的足够数量的编码包时，若这些编码块为线性无关，即相互之间无法通过线性组合得到，即可解码出原始数据报文。也就是，在网络编码环境下，Interest 报文的命名以 generation 名称进行标识。

除此之外，网络编码环境下的 Interest 报文在原来的基础上增加了两个字段，如图 1 所示。

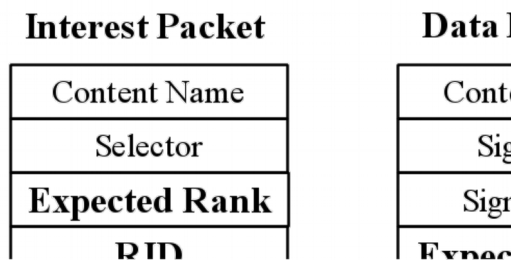


图 1 NC-NDN 包格式

Expected Rank：该字段由请求者根据目前已有的线性无关编码块的数量以及尚在等待编码块返回的 Interest 报文的数量生成，是二者之和加一。

根据 Nguyen 等人 [12] 的工作，数据源若具有不小于该值的线性无关编码块就可以再编码生成新的编码块响应 Interest 报文的请求。所以节点可以根据此字段决定是否响应用户的编码块请求。

RID：该字段用于表明请求者的身份。中间节点可以根据该字段确定具有相同名称前缀和不同 Expected Rank 的两个 Interest 报文是否是同一请求者发送，还是来自不同的请求者。若是前一种情况，则这两个报文应该分别转发来获取不同的编码块，若不是，则这两个 Interest 报文可以聚合，减少冗余的传输。

##### 3.1.2 Data 报文格式

网络编码环境下的 Data 报文其数据部分为经过编码的编码数据块，除此之外，在原来的基础上还添加了一个字段，如图 1 所示。

Expected Rank：该字段由 Interest 报文的 Expected Rank 字段拷贝而来。当节点收到 Data 报文时也是根据该字段决定是否响应 PIT 中名称前缀相匹配的 Interest 报文。

#### 3.2 报文处理流程

与 NDN 类似，NC-NDN 节点的转发引擎由 CS，PIT 和 FIB 三个数据结构组成。其中 CS 用于缓存编码块，同属一代数据内容的编码块使用该代数据内容的名字作为索引统一进行管理。相比于 NDN 节点的 PIT，NC-NDN 节点的 PIT 还需记录 Interest 报文 Expected Rank 和 RID 两个字段的值，以便节点判断稍后到达的同代数据内容其他编码块的请求是否可以聚合。

##### 3.2.1 节点对 Interest 报文的处理

节点对 Interest 报文的处理流程如算法 1 所示。节点从接口  $f$  收到的请求一代数据内容编码块的 Interest 报文  $p$ 。该 Interest 报文的 Expect Rank 为  $p.rank$ ，请求者的 RID 为  $p.rid$ ，Nonce 值为  $p.nonce$ 。当节点收到该 Interest 报文时，首先检查本地的 ContentStore，若有内容前缀相匹配的条目，且该条目的线性无关编码块数量  $K \geq p.rank$ ，则表明由这  $K$  个编码块再编码生成的编码块对请求者来说很大可能上是非线性无关的，此时使用这  $K$  个编码块再编码形成一个新的编码块  $E_k$  响应该 Interest 报文。

若 ContentStore 不匹配，该节点则检查 PIT，若存在 PIT 条目包含完全相同的报文，则说明该 Interest 报文是收到的重复报文，节点丢弃该报文。

若该报文不是重复报文，网络节点则查看 PIT 中是否有其他请求者发送的请求相同编码块且 Expect Rank 不小于  $p.rank$  的条目，若存在这样的条目，则可以将收到的 Interest 报文聚合到该条目中，即将 Interest 报文的 RID，Nonce 值及到达的接口均记录到该条目中。否则，节点则查看 FIB 中是否有匹配的条目，若有，则按照转发策略将报文转发到下一跳，并为其建立 PIT 条目，若没有，则丢弃该报文。

算法 1 NC-NDN 中 Interest 报文处理流程

```

OnInterest-Process(Interest packet  $p$ , Incoming
face  $f$ )
1) if CS matched &&  $K \geq p.rank$  do
2) Create PIT entry  $e$ 
3)  $E_k \leftarrow \text{encode}(K)$ 
4) Send  $E_k$  over face  $f$ 
5) Delete  $e$ 
6) else if PIT matched && ( $PIT_p.rank == p.rank$ ,
 $PIT_p.rid == p.rid$ ,  $PIT_p.nonce == p.nonce$ ) do
7) Discard  $p$ ;
8) else if PIT matched && ( $PIT_p.rank >=$ 
 $p.rank$ ,  $PIT_p.rid != p.rid$ ) do
9) Insert  $p.rid$ ,  $p.nonce$ ,  $f$  to  $PIT_p$ 
10) else if FIB matched do
11) Forward  $p$  and Create PIT entry
12) else
13) Discard  $p$ ;
14) endif
15) endif
16) endif
17) endif

```

### 3.2.2 节点对 Data 报文的处理

NC-NDN 中节点对 Data 报文的处理流程如算法 2 所示。当节点收到编码数据块  $d$  时，首先根据缓存替换策略决定是否缓存该编码块。然后检查该节点的 PIT 条目，如果没有相匹配的条目，则丢弃  $d$ 。若有多个相匹配的 PIT 条目，称这些 PIT 条目为  $PIT_s$ ，对  $PIT_s$  中的每一条目  $PIT_m$ ，若其名称前缀匹配，且  $PIT_m.rank \leq d.rank$ ，则将  $d$  按照该条目记录的接口进行转发，并删除该条目。

算法 2 NC-NDN 中 Data 报文处理流程

OnData-Process(Data packet  $d$ )

1) Cache  $d$  according to the policy

```

2)  $PIT_s \leftarrow$  PIT entries that matched
3) if  $PIT_s == \emptyset$  then
4) Discard  $d$ ;
5) else
6) for all  $PIT_m$  in  $PIT_s$  that  $PIT_m.rank \leq d.rank$ 
do
7) for all face in  $PIT_m$  do
8) Send  $d$  to  $PIT_m.f$ 
9) if  $PIT_m$  has no face do
10) Delete  $PIT_m$ 
11) endif
12) endfor
13) endfor
14) endif

```

### 3.3 缓存替换策略

NC-NDN 网络节点缓存的编码块并不独立地用于响应用户的请求，而是与缓存的同代数据内容的其他编码块一起再编码后来响应用户的请求，因此，节点中 ContentStore 的条目不再是存储某一数据块，而是以数组的形式存储某一代数据内容的数个编码块。

当 ContentStore 中缓存的编码块超过最大值时，不能按照原始的 LRU 策略选择条目进行置换，因为该条目可能包含数个编码块。因此，对网络编码环境下的缓存替换策略做了如下改进：当有新的编码块而缓存空间已满时，选择需要置换的条目，当该条目只缓存了一个编码块时，则删除该条目；当该条目缓存了两个或两个以上编码块时，随机选择两个编码块进行再编码，并用这个再编码的编码块替换被选择的两个编码块（该操作可以增加以该再编码块响应用户的请求时，该再编码块与用户已有编码块的线性无关性）。无论是删除还是替换，都会使得 ContentStore 空出一个编码块的空间来缓存新到达的编码块。若在 ContentStore 中可以找到匹配该编码块的条目，则将编码块插入该条目，否则，为该编码块创建一个新的条目。

## 4 性能评估

为了验证 NC-NDN 模型在传输数据内容方面的优势，本文在 ndnsim[15] 仿真平台上进行模拟评估。仿真实验的硬件环境是 Intel Xeon E5 2.20GHz 处理器、64GB 内存；操作系统是 Debian Linux

9.2.

为了更好的评估 NC-NDN 系统的网络传输性能，需要在仿真过程中对一些参数进行统计分析，本实验统计的性能指标的具体定义如下：

缓存命中率：当请求者收到的编码数据块为网络中节点的 ContentStore 响应，则表示缓存命中。以 TotalRev 表示某一请求者所收到的编码数据块总数，TotalCa 表示这些编码数据块中由 ContentStore 响应的编码数据块数量，则缓存命中率  $CacheHitRatio=TotalCa/TotalRev$ 。

平均路由跳数：在编码数据块返回的过程中，每当其经过一个路由节点即认为经过了一跳。统计某一请求者收到的编码数据块总数 TotalRev 所经过的路由跳数总和 TotalHop，则平均路由跳数  $AvgHop=TotalHop/TotalRev$ 。

我们在 butterfly 拓扑下对 NC-NDN 系统的网络传输效率进行评估，具体拓扑如图 2 所示。

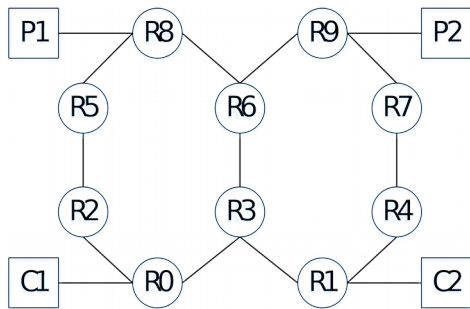


图 2 butterfly 拓扑

拓扑中共有 10 个节点，各个节点均为具有网络编码功能的路由节点，R0 和 R1 节点分别搭载一个请求者 C1 和 C2（即 C1 和 C2 分别与 R0 和 R1 同属于一个节点），R8 和 R9 分别搭载一个数据源 P1 和 P2。拓扑中两个数据源均可响应请求者发出的 Interest 报文。ContentStore 所采用的缓存替换策略为 LRU 策略。请求者发送的代序号遵循 zipf 分布，每个实验都会通过改变随机数生成的种子运行 10 轮，并通过统计 10 轮运行结果的平均数来得到最终的实验结果。实验中具体参数设置如下表：

表 1	实验参数设置
链路带宽	1Mbps
链路延迟	1ms
generation 序号数量	$10^4$
generation 包含编码块数量	30
s of Zipf	0.73

在 NC-NDN 中，各个节点均通过计算所有可用的路径来生成 FIB 表，从而使得当 Interest 报文沿所有可用的接口发送时，路由节点可收到来自不同数据源的编码数据包，进而增加节点以缓存编码块响应 Interest 报文的能力。所以基于 NC-NDN 系统的实验均采用洪泛转发策略。为保持对比仿真实验的一致性，NDN 环境下各个节点也是通过计算所有可用的路径来生成 FIB 表，转发策略则是基于以下三种策略进行仿真评估。

洪泛策略 (Flooding)：Interest 报文到达后，节点按照匹配该报文前缀的 FIB 条目中所有可用的接口进行转发（除了 Interest 报文的到达接口）。

最佳路由策略 (BestRoute)：Interest 报文到达后，节点选择匹配该报文前缀的 FIB 条目所列接口中最佳的接口作为发出接口。

随机转发策略 (Flooding-probability)：Interest 报文到达后，节点从匹配该报文前缀的 FIB 条目所列接口中随机选择一个接口作为发出接口。

为更好的对比 NDN 和 NC-NDN 两种环境下的网络传输效率，我们通过改变 ContentStore 的缓存大小来进行对比实验。

实验结果如图 3 和 4 所示。

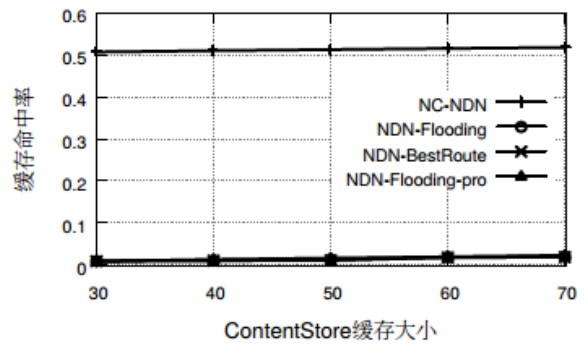


图 3 NDN 与 NC-NDN 缓存命中率对比

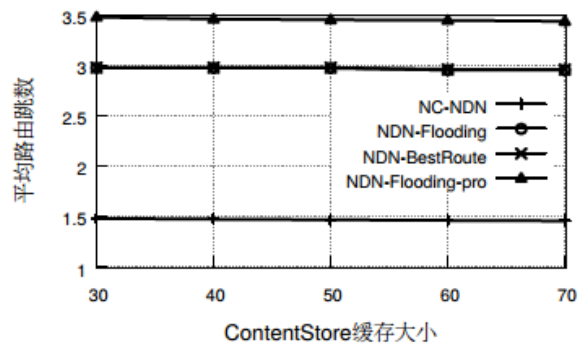


图 4 NDN 与 NC-NDN 路由跳数对比

图3为缓存命中率对比结果,可以发现,随着ContentStore缓存的增大,请求者收到的编码数据块的缓存命中率都在缓慢增大,这说明随着ContentStore缓存的增大,越来越多的Interest报文可以在缓存中得到响应。对比图3中四条曲线可以发现,NDN在三种转发策略下的缓存命中率基本一致。从具体数据来看,NDN中随机转发策略要优于洪泛策略,洪泛策略优于最佳路由策略,这是因为随机转发策略会提高节点缓存内容的多样性,进而提高缓存命中率。而在NC-NDN中,缓存命中率比NDN中高50%左右。图4为路由跳数对比图,可以看到随着ContentStore缓存大小逐渐增大,路由跳数也逐渐减小,NC-NDN模型中平均路由跳数相比于NDN会低50%左右。这与缓存命中率的对比结果相一致。而NDN在最佳路由和洪泛转发策略下的网络传输效率表现基本一致,但是随机转发策略下的平均路由跳数统计结果明显高于另两种转发策略,这是因为Interest报文在转发过程中,节点可能会将其转发到较远的路径。如图2中,请求者C1到P2的最短路径是节点0-3-6-9,无论是洪泛策略还是最佳路径策略,该条路径上都会有流量通过并会有数据包返回,但是在随机转发策略中,Interest报文可能会沿路径0-3-1-4-7-9到达数据源,从而造成请求者所收到的数据包经过的路由跳数较多。

结合图3和图4实验结果可知,在butterfly拓扑下,应用网络编码的NDN网络传输效率提升明显,主要是因为NC-NDN中,各请求者可并行从多数据源获得编码数据块,这些编码数据块添加进经过节点的ContentStore又可增加中间节点以缓存内容响应Interest报文的能力。如请求者C1开始请求某代数据内容的第一个编码块时,Interest报文沿各条可用路径到达两个数据源,最终R2和R3节点均会返回一个编码块到R0,R0以其中一个返回给请求者C1作为响应,并缓存另一个,当请求者C1继续请求同代数据内容的下一个编码块时,在节点R0即可得到响应,所以在butterfly拓扑中,应用网络编码的NDN的缓存命中率均在0.5以上。请求者收到的第一个编码块经过的路由跳数是3跳,而收到的第二个编码块经过的路由跳数是0跳,所以图4中基于NC-NDN系统的路由跳数均在1.5以下。

## 5 结束语

本文提出了网络编码与命名数据网络融合的方案NC-NDN,并完成了该模型的设计,包括报文格式,网络节点对报文的处理以及缓存组织和替换策略。最后通过仿真实验证明与NDN相比,NC-NDN具有更优的网络传输性能。

本文采用的仿真实验拓扑较简单,后续会考虑在更真实的网络拓扑中进行仿真实验。另外,融合网络编码功能的NDN可潜在地支持请求者以Pipeline模式发送Interest报文,后续将继续开展在此方向的研究,以进一步提高网络传输数据内容的性能。

## 参考文献:

- [1] XYLOMENOS G, VERVERIDIS C, SIRIS V, et al. A Survey of Information-Centric Networking Research[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2014, 16(2):1024-1049.
- [2] Named data networking[EB/OL]. <http://named-data.net/>, 2018
- [3] ROSSINI G, ROSSI D. Evaluating CCN multi-path interest forwarding strategies[J]. Computer Communications. 2013, 36(7):771-778.
- [4] UDUGAMA A, ZHANG X, KULADINITHI K, et al. An On-demand Multi-Path Interest Forwarding strategy for content retrievals in CCN[C]// IEEE Network Operations and Management Symposium, NOMS, Krakow, Poland, 2014:1-6.
- [5] CHIOCCHETTI R, PERINO D, CAROFIGLIO G, et al. INFORM: a dynamic interest forwarding mechanism for information centric networking[C]// ICN'13, ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking, Hong Kong, China, 2013:9-14.
- [6] CHIOCCHETTI R, ROSSI D, ROSSINI G, et al. Exploit the known or explore the unknown?: hamlet-like doubts in ICN[C]// ICN'12, ACM Proceedings of the Information-Centric Networking Workshop, Helsinki, Finland, 2012:7-12.
- [7] MONTPETIT M, WESTPHAL D, TROSSEN D, et al. Network coding meets information-centric networking: an architectural case for information dispersion through native network coding[J]. CoRR, 2012, 2000(1): 31-36.
- [8] WU Q, LI Z, XIE G. CodingCache: multipath-aware CCN cache with network coding[C]// ICN'13, 2013 ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking, Hong Kong, China, 2013:41-42.
- [9] WU Q, LI Z, TYSON G, et al. Privacy-Aware Multipath Video Caching for Content-Centric Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(8):2219-2230.
- [10] ZHAO Z, TAN X, SU J, et al. Adaptive traffic scheduling via network

coding in NDN[C]// Chinese Control Conference, Chengdu, China, 2016:7200-7205.

- [11] MATSUZONO K, ASAEDA H, TURLETTI T. Low latency low loss streaming using in-network coding and caching[C]// IEEE Conference on Computer Communications, INFOCOM, Atlanta, GA, USA, 2017:1-9.
- [12] NGUYEN D, FUKUSHIMA M, SUGIYAMA K, et al. CoNAT: A network coding-based interest aggregation in content centric networks[C]// IEEE International Conference on Communications, ICC, London, United Kingdom, 2015:5715-5720.
- [13] LIU Y, YU S. Network coding-based multisource content delivery in Content Centric Networking[J]. J. Network and Computer Applications, 2016, 64:167-175.
- [14] SALTARIN J, BOURTSOULATZE E, THOMOS N, et al. NetCod-CCN: A network coding approach for content-centric networks[C]// The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, INFOCOM, San Francisco, CA, USA, 2016:1-9.
- [15] AFANASYEV A, MOISEENKO I, ZHANG L. ndnSIM: ndn simulator for NS-3[R]. NDN, Technical Report NDN-0005, 2012:1-7



程光 (1973-), 男, 安徽黄山人, 博士, 东南大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为网络空间安全监测和防护、网络大数据分析。



臧小东 (1985-), 男, 山东济宁人, 东南大学博士生, 主要研究方向为网络安全、网络管理。

#### [作者简介]



胡晓艳 (1985-), 女, 江西金溪人, 博士, 东南大学讲师, 主要研究方向为网络体系结构、网络安全。



郑少琦 (1995-), 女, 安徽宿州人, 东南大学硕士研究生, 主要研究方向为命名数据网络。



龚俭 (1957-), 男, 上海人, 博士, 东南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为网络安全、网络管理。