

NDN 协议下的网络编码传输性能研究

韩晓冬, 高飞, 王爱华

(北京理工大学 信息与电子学院, 北京 100081)

摘要: 当前的信息爆炸时代使得海量数据集中出现, 数据传输速率呈指数级增长, 数据命名网络(named data networking, NDN)中特有的大数据量的计算与存储方式, 传统的互联网体系架构已经无法满足大数据量网络的性能需求. 本文在 NDN 网络中引入网络编码技术, 拟解决 NDN 传输协议下的网络传输性能问题, 着重探讨了时延以及吞吐量两个网络性能参数. 实验结果表明网络编码机制下能够实现多播路由无法达到的吞吐量, 而且将多播路由下的网络时延减小了将近 50%, 改进网络性能, 节省了网络传输资源, 满足当前处理大数据业务的要求.

关键词: 数据命名网络; 网络编码; 时延; 吞吐量

中图分类号: TN 911.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-0645(2017)05-0506-05

DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2017.05.013

Network Coding Transmission Performance Under the NDN Protocol

HAN Xiao-dong, GAO Fei, WANG Ai-hua

(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The current era of information explosion makes the emergence of massive data, data transmission rate is growing exponentially, for NDN (named data networking) network specific amount of computing and large data storage, tradition internet architecture has been unable to meet the performance needs of large data networks. Delay is an important parameter to measure network performance merits, network coding can reduce network latency under the premise of guaranteed throughput. A network coding was introduced in NDN network, in order to resolve that network transmission performance problems under NDN transfer protocol, focusing on the two network performance parameters with latency and throughput. Experimental results demonstrate that the NDN combined with network coding can ensure high network throughput which multicast route can't attain, simultaneously reduce network latency with 50%, improve network performance, save the cost of network consumption, meet the current requirements of handling big data services.

Key words: NDN; network coding; delay; throughput

现今人们对大数据量的需求日益增长, 迫切需要网络数据传输能力的提升^[1-3], 随之带来的超高网络吞吐量以及时延问题就成为影响网络性能的关键. 虽然传统 IP 网络解决的互联互通问题, 也能在一定程度上实现智能网关的功能, 但是基于地址的 TCP/IP 协议已经远远不能满足未来资源复用和流量均衡的网络性能要求, 而且这种老式的通信协议

在安全性、可靠性以及兼容性等方面都已经无法达到现在人们对海量数据的处理需求, 一种全新的网络体系——数据命名网络(named data networking, NDN)网络正在渗透到日新月异的互联网发展中. 在 NDN 网络中用户的着眼点完全专注于数据内容本身, 改变了传统的根据 IP 地址来传输数据信息的方式, 但是网络带宽成为影响其性能的主要瓶

颈^[4-6], 本文将网络编码技术应用到全新的 NDN 传输协议下, 旨在提高网络吞吐量, 满足以云计算为主要方式的大数据处理业务的同时, 减小数据包传送时延, 改善网络性能, 为未来大数据的处理提供了一条新的路径, 在实现动态大规模计算和存储、建设绿色家庭以及绿色通信^[7-11]等方面都有重要的推动作用, 对国家和企业经济效益的提高具有重大的意义。

1 NDN 网络包交换模型与带宽利用率

1.1 包交换模型

传统基于 IP 的数据传输方式由于系统耦合性较强, 向下兼容性较差, 导致网络通信成本过度消耗; 而 NDN 网络是以解耦合的方式解放了以前的网络域名, 使得网络从位置相关变成了内容相关。NDN 网络的数据传输模式主要是通过兴趣包 (interest packet) 和数据包 (data packet) 来共同协作完成的, 如图 1 所示^[4]。假设第一个单位时间内用户 A 向中继节点 R 发送了 Interest 包, 服务器 S 接收到 R 的转发请求之后将用户所需要的 Data 包暂存在节点 R 的基于内容的缓冲存储器 (content store, CS) 中。如果在第二个单位时间又有用户 B 加入此数据请求传输过程, 那么 R 就会在缓存索引表中添加 B 的地址, 然后将其中缓存的数据包按照 B 的上行路径发送出去, 这样智能中继 R 就将两个或者多个相等的单播变成了一个多播过程, 避免了 S 的重复发送, 在很大程度上缓解了服务器的压力, 节省了网络开销, 提高了数据传输效率。

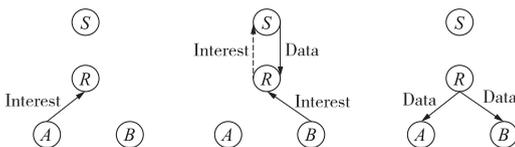


图 1 NDN 包交换模型
Fig. 1 NDN packet exchange model

1.2 带宽利用率

如图 2 所示的有线通信系统中, 假设源节点 s 要发送一个文件 F 给两个接收者 T_1 和 T_2 。在 IP 网络中由于没有索引表, 传输过程需要 4 步才能完成。假设每单位时间传输一个数据包, 数据块的大小是 4 volume, 那么带宽利用率就是 $(1 \times 4) / 1 = 4$ 。而在 NDN 网络中, 由于在 T_1 接收数据包的过程中 R 已经将 $S \rightarrow R$ 发送的数据内容记录下来, 因此根据 PIT 中的信息直接可以进行 $R \rightarrow T_2$ 这一步, 所

以省略了一个中间重复步骤, 那么带宽利用率就变成了 $(1 \times 3) / 1 = 3$, 在保证网络吞吐量的前提下将带宽利用率提高了 25%。

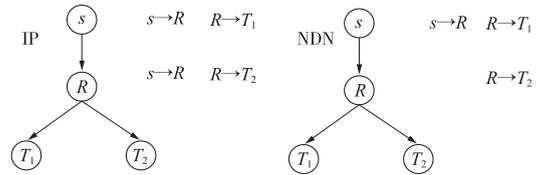


图 2 IP 网络与 NDN 网络占用带宽对比图
Fig. 2 Compare of bandwidth between IP and NDN

2 网络性能指标分析

2.1 吞吐量

在经典的蝶形网络结构中, 如图 3 所示。采用网络编码与传统的路由机制时, 吞吐量分别为 2 bit/节点与 1.5 bit/节点, 因此网络编码可以实现多播路由时无法达到的网络容量, 提升了网络性能。

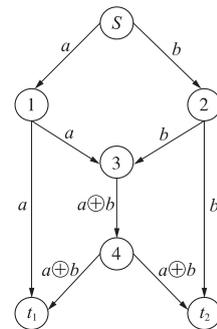


图 3 蝶形网络中的网络编码
Fig. 3 Network coding in butterfly network

2.2 时延

在图 4(a) 所示的线性网络链路中, 时延 $t_{\text{delay}} = n - 1$; 而在图 4(b) 所示的 Y 型网络结构中, 时延问题可以表述为式 (1)。

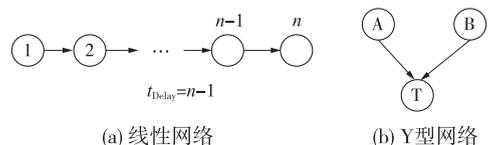


图 4 线性网络与 Y 型网络结构时延对比图
Fig. 4 Delay comparison with linear and Y-shape network

假设信道的传播时延为一个单位时间 1。

$$\begin{cases} d(T) = \max\{d(A), d(B)\} + 1 \\ d(v) = 0; \quad v \in S \end{cases} \quad (1)$$

此问题可进一步写成式 (2)。

$$d(u) = \max\{d(v)\} + 1, \quad v \in \sigma(u). \quad (2)$$

其中 $\sigma(u)$ 表示 u 进行网络编码所涉及到的上级节点的集合. 这是一类动态规划问题, 具有动态规划解, 即将无权最长简单路径问题变成了网络编码条件下的最长路径求最优解的问题.

问题 $d(T) = \max\{d(u)\} + 1, u \in \sigma(T)$ 具有最优子结构.

证明: if $d(v) > d(u), u \in \sigma(T) \Rightarrow v \notin \sigma(T)$, 取 $d(T) = d(v) + 1$,

令 $r \in \sigma(T)$ 且 $d(r) = \max_{u \in \sigma(T)}\{d(u)\}$, 则 $d(T') = d(r) + 1$.

又因为 $d(v) > d(r) \Rightarrow d(T') < d(v) + 1 = d(T)$, 假设 $d(T) = d(v) + 1, \Rightarrow d(T') < d(T)$ 与 $d(T)$ 最小相矛盾, 所以 $d(T)$ 不是最优解.

所以子问题的解必取 $r = \max_{d(r)}\{r\}, r \in \sigma(T)$ 即原问题具有最优子结构. 对 $d(T)$ 而言, 没有其他节点会出现在最小路径上, 即此问题所包含的子问题是独立的. 由式(2)分析可知, 解原问题的递归算法可反复解同样的子问题, 即此递归算法在不断调用同一问题, 执行 max 算法, 所以该最优问题包含重叠子问题, 具有重叠性. 因为在简单网络中节点可以任选, 而在有网络编码的限制下存在对编码节点的选择. 对于一个有向无环图 $G(V, E)$, 在式(2)的前提下, 每条边的出点 $\text{Out}(v)$ 最多被比较一次, 且每个节点要执行一次 max 运算, 所以执行时间为 $O(|V| + |E|)$, 即时间复杂度为 $\Theta(|V| + |E|)$.

3 仿真结果及讨论

信宿节点在发送 Interest 包的上行过程中就会将沿途得到的网络拓扑信息记录在数据包中, 当源节点 S 收齐所有的 Interest 包之后就得到了整个网络的拓扑结构, S 会根据一种通用的网络编码算法^[12-14]计算出哪些节点满足网络编码的条件(最大流-最小割)^[15-17], 在此前提下对满足网络编码性质的节点发送数据包, 这些目的节点在接收到网络编码的组合数据包之后, 只要再根据另外的 Interest 包从其他的节点接收到满足其译码要求的数据包即可解出源信息. 因为 NDN 网络是针对内容的, 所以只需对数据包的内容进行网络编码, 这部分当作数据包的净荷; 而数据包的 ID 号不进行编码或者是采用其他的简单运算进行连接组合, 这样用户节点在收到组合包之后可以解出相应的 ID, 进而成功译码.

当网络拓扑未知或者是上述条件无法满足时, 可以采取随机网络编码^[18-19]的算法进行计算, 这里先默认为源节点通过上行 Interest 包能够获知拓扑信息. 由于本文进行的是理论研究, 对于不影响最终实验结果性能的实际工程问题暂时不予考虑, 此处的仿真也是建立在收端节点知道是哪一个用户发来的 Interest 包, 即忽略上行过程, 默认路径已经被节点已知的情况下进行. 依据 1.1 节的分析可知, 由于 Interest 包中携带的内容其实可以看作是签名信息, 此信息的大小远远小于 Data 包, 可忽略不计.

3.1 吞吐量

此处针对图 3 的蝶形网络进行仿真, 由信源 S 发送数据包, 目的节点 $t_1(t_2)$ 接收数据. 假设发送速率小于信道容量, 不存在丢包现象. 吞吐量是发送速率的一个函数, 随着数据速率的增大, 接收节点的吞吐量也相应地得到很快的提升, 根据理论分析可知网络的最大流为 2, 因此采用网络编码之后能够达到网络的最大流, 即每个节点的信息速率在达到各自的最大容量即最小割的值之后就趋于平稳, 出现了吞吐量的“天花板效应”. 从图 5 所示的仿真结果可以看出, 在传统的多播路由方式下, 瓶颈链路的信息传输速率是网络编码机制下的 1/2, 即验证了图 3 中的最大流最小割的理论分析, 在超过其信道容量时, 多播路由只能传送其信息速率的上限值; 而网络编码可以达到多播容量.

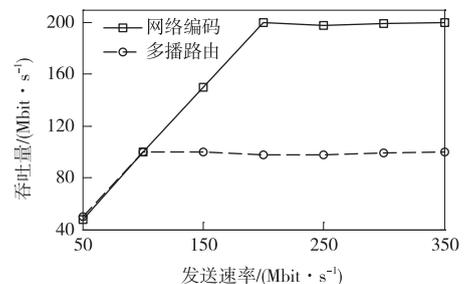


图 5 传输速率-吞吐量性能对比曲线图
Fig. 5 Performance of throughput with sending rate

3.2 时延

这里的时延时指数据包在信道上的传播时间以及数据包从信源完全发出所用的传输时延, 是第一个数据包从信源发出开始到最后一个数据包完全被信宿接收的时间间隔, 这里的仿真条件为每条链路的速率设为 1 Mbit/s, 信源的发送速率是 1 000 个/s 数据包, 每个数据包的大小为 1 000 bit.

根据 2.3 节的分析可知, 使用网络编码时由于

在信宿节点接收数据进行异或解码,所以 t_1 在收到路径 $p_1:s \rightarrow 1 \rightarrow t_1$ 发送来的数据包之后需要等待通过瓶颈路径 $p_2:s \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow t_1$ 发送的数据包,假设每条链路都具有单位时延,那么根据式(3)可以得到 t_1 的时延为 $d(T) = \max\{d(p_1), d(p_2)\} + 1 = 4$. 而在传统的多播路由机制下,由于减少了网络编码操作所耗费的等待时间,所以 $d(t) = d(p_1) = 2$,但是当数据包非常大时,可以将数据包拆分发送,这时相应地传输时延就提高了,所以在需要对大数据包进行处理的大型网络中需要考虑传输时延.

图 6 中当数据包较小或数量较少时,这时发送数据包不需要等待,两者的传输时延比较接近,但是随着发送数据包个数的增多,网络出现拥塞现象,路由机制已经无法满足传输性能,而网络编码显示出了其均衡网络负载的优势,因此两者的传输时延差距越来越明显. 图 7 中的传播时延验证了之前的理论分析,两者呈现 2 倍的关系. 由此可知传播时延与传输路径有关,所以当发送的数据量非常小时,传输时延与传播时延相比可以忽略不计,这时总的完成时间是由网络的拓扑结构决定的.

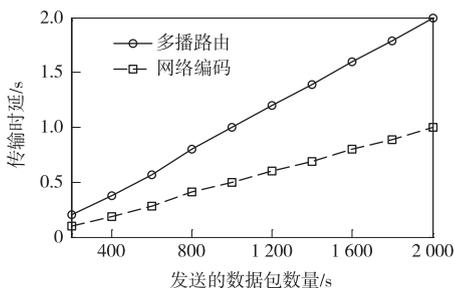


图 6 多播路由与网络编码机制下数据包数量-传输时延性能曲线
Fig. 6 Performance of transmission delay with packet number on network coding

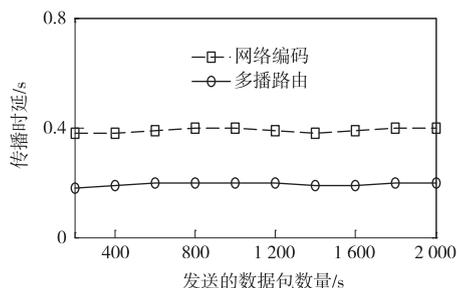


图 7 多播路由与网络编码机制下数据包数量-传播时延性能曲线
Fig. 7 Performance of propagation delay with packet number on multicast routing and network coding

由于总时延可以写成 $y = t_{TP} + t_{TT}$ 的形式,其中 t_{TP} 是传播时延,对应图 7; t_{TT} 是传输时延,对应图 6. 传播时延与满足网络最大流-最小割的发送

速率 ω 呈负相关,由图 6 可以看出传输时延的性质呈一次线性方程 $y = ax + b$ 的形式,其中在 y 轴 (transmission delay) 上的截距即为当信源的发送速率最小时,传输这些数据包所需要的时间. 考虑瞬时发送时,图 7 中的传播时延均与发送的文件大小无关,因此总时延会出现图 8 中所示的一次线性方程组的形式,这样两条线必然会有一个交点,而这个交点就对应着发送文件的数据包大小. 图 3 中的链路 a 和 b 的信息速率之和小于瓶颈链路的信道容量时,多播路由的时延较小;而当信息速率超过了瓶颈链路的信道容量时,网络出现拥塞,这时就体现出网络编码的处理优势,时延增加的速率相对比较缓慢.

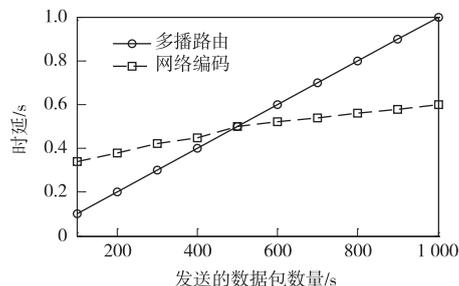


图 8 数据包数量-时延性能曲线对比图
Fig. 8 Comparison performance of packet delay with packet number

由图 3 分析可知此时信宿节点的最大流为 2,即 $\omega = 2$. 在满足最大流-最小割的前提下,由图 8 可以看出随着发送数据包的增多,两者的总时延差距会随之增大,而当时,多播机制下的传输时延会远远大于网络编码条件下的传输时延,这时必须考虑此因素,随着数据包数量的增加,相应地总时延对比会越明显. 当网络结构的层级比较少时,这样不会因为上行 Interest 包所记录的拓扑信息过多而造成网络开销增大,也可以在小世界模型的网络系统中应用,比如蜂窝电话网. 网络编码所用的传播时延相应较小,这时对大数据量进行处理就表现出网络编码的优势,在保证吞吐量的同时减少发送时间,适用于多信源与多用户之间的通信.

由图 8 的仿真结果可以看出在数据包数量较少时,多播路由机制的完成时间较短,但是随着数据包的增大,时延也相应增加,在采用网络编码保证吞吐量的前提下,完成时间与传统的路由方式相比可以提高 50% 以上. 在高吞吐量网络中,传统的多播路由方式需要的传输时间要多于网络编码,通过在中间节点进行编码节省了传输时间,因

此在实现最大吞吐量的同时大大降低了所用的网络开销。

4 结 论

NDN 将网络层由传统的地址命名转变成数据命名,把数据包分割成内容块进行分发,满足了多播应用的需要。NDN 网络的大数据量特性会带来比较严重的网络拥塞和路径冲突,使用传统的多播路由策略在网络负载较大时会严重消耗网络资源,不能实现最优的网络性能,相比之下网络编码特有的提升带宽利用率,以及减小传输时间的优势将 NDN 网络的性能做了最大限度的优化和提升,在保证高吞吐量的前提下节省网络开销,提高数据处理效率。通过理论仿真验证了在 NDN 网络中应用网络编码,可以实现多播路由无法达到的吞吐量,减小网络时延。随着网络拓扑结构复杂性的增加以及对大数据业务的处理,在实现高网络容量的同时通信完成时间也有相应下降,能够有效地提升数据传输效率,减少网络拥堵现象及网络能耗。

参考文献:

- [1] Ericsson. 5G radio access, research and vision[S]. [S. l.]: Ericsson, 2013.
- [2] Fallgren M, Scenarios B T. Requirements and KPIs for 5G Mobile and wireless system [C] // ICT - 317669 METIS Project. [S. l.]: METIS, 2013:1 - 84.
- [3] Sapana Singh, Pratap Singh. Key concepts and network architecture for 5G mobile technology[J]. International Journal of Scientific Research Engineering & Technology, 2012,1(5):165 - 170.
- [4] Van Jacobson, Smetters Diana K, Thornton James D, et al. Networking named content [C] // CoNEXT' 09 Proceedings of the 5th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. New York: ACM, 2009:1 - 12.
- [5] Jiang Xiaoke, Bi Jun. nCDN: CDN enhanced with NDN [C] // Proceedings of 2014 IEEE INFOCOM Workshop on Name-Oriented Mobility. [S. l.]: IEEE, 2014: 440 - 445.
- [6] Wang Yi, He Keqiang, Dai Huichen, et al. Scalable name lookup in NDN using effective name component encoding [C] // Proceedings of 32nd IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. [S. l.]: ICDCS, 2012:688 - 697.
- [7] Clarke I, Sandberg O, Wiley B, et al. Freenet: a

distributed anonymous information storage and retrieval system [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2001(2009):46 - 66.

- [8] Farrell S, Cahill V. Delay-and disruption-tolerant networking [M]. [S. l.]: Artech House Publishers, 2006.
- [9] Marsan M A, Chiaraviglio L, Ciullo D, et al. Optimal energy savings in cellular access networks [C] // Proceedings of IEEE ICC Workshops. [S. l.]: IEEE, 2009.
- [10] Hasan Z, Boostanimehr H, Bhargava V K. Green cellular networks: a survey, some research issues and challenges [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2011,13(4):524 - 540.
- [11] Fettweis G P, Zimmermann E. Ict energy consumption-trends and challenges [C] // Proceedings of the 11th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications. Lapland, Finland: [s. n.], 2008.
- [12] Li S Y R, Yeung R W, Cai N. Linear network coding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(2):371-381.
- [13] Jaggi Sidharth, Sanders Peter, Chou Philip A, et al. Polynomial time algorithms for multicast network code construction [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005,51(6):1973 - 1982.
- [14] Peter Sanders, Sebastian Egner, Ludo Tolhuizen. Polynomial time algorithms for network information flow [C] // Proceedings of SPAA' 03. San Diego, California, USA: [s. n.], 2003:7 - 9.
- [15] Yeung R W, Li S Y R, Cai N, et al. Network coding theory [M]. [S. l.]: Now Publishers Inc., 2006.
- [16] Alshwede R, Cai N, Li S Y R, et al. Network information flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000,46(4):1204 - 1216.
- [17] Koetter R, Medard M. An algebraic approach to network coding [J]. IEEE/ACM Transaction Networking, 2003,11(5):782 - 795.
- [18] Tracey Ho, Muriel Médard, Ralf Koetter, et al. A random linear network coding approach to multicast [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(10):4413 - 4430.
- [19] Ho Tracey, Médard Muriel, Shi J, et al. On randomized network coding [C] // Proc. of 41st Annu. Allerton Conference. Communication, Control and Computing, Monticello, IL: [s. n.], 2003.