

一种基于丢包预测的选择性网络编码策略

郭斌¹ 余丹丹² 卢伟² 黄明和² 曾雅琳²

(江西师范大学信息化办公室 南昌 330022)¹ (江西师范大学软件学院 南昌 330022)²

摘要 随着多样化无线网络接入技术和多网络接口设备的大规模应用,多宿主网络终端的传输性能受到国内外学术界的广泛关注。多路径传输协议(MTCP)是其中代表性研究之一,其通过聚合多条链路的带宽资源,把数据流分发到多条链路上并行传输,有效地提高了网络的传输性能。然而,在链路差异大的异构网络中传输数据,容易引起数据包失序严重等问题,从而给传输性能造成巨大的影响。因此,国内外许多学者提出了网络编码(MPTCP-NC)策略来弥补这个缺陷,该方式有效提升了网络传输的鲁棒性。但是,编码系数的频繁生成和计算,会额外增加 MPTCP 传输时延,并且会浪费有限的带宽资源。针对此问题,文中提出了一种基于丢包预测的 MPTCP 选择性编码策略(MPTCP-SNC),该策略充分考虑了异构无线网络环境的差异性,并根据链路丢包率状态选择性执行编码策略,降低了网络编码带来的额外消耗,并提高了 MPTCP 的传输性能。

关键词 异构无线网络,多路径 TCP,网络编码,编码系数

中图分类号 TP393 文献标识码 A

Selective Network Coding Strategy Based on Packet Loss Prediction

GUO Bin¹ YU Dan-dan² LU Wei² HUANG Ming-he² ZENG Ya-lin²

(Information Office, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)¹

(School of Software, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)²

Abstract With the development of diversified wireless network access technology and large-scale equipment of multi-network interface devices, network transmission performance for multi-homed terminals is widely concerned by academic circles at home and abroad. Multi-path Transmission Control Protocol (MPTCP) is one of the classical studies, which distributes data to multiple paths in parallel way and enhances the performance of transmission. However, in heterogeneous wireless networks, due to the characteristic of large difference in path, it is easy to cause many problems including serious packet disorder and huge impact on MPTCP performance. Therefore, many scholars proposed that using Network Coding (MPTCP-NC) to compensate for this defect, which effectively improves the robustness of network transmission. Furthermore, the frequent generation and calculation of coding coefficients additionally increases the MPTCP transmission delay and wastes the limited bandwidth resources. Aiming at solving these problems, this paper proposed an MPTCP's Selective Network Coding (MPTCP-SNC) based on packet loss prediction, MPTCP-SNC fully considers the differences of heterogeneous wireless network environment and selectively performs network coding according to the loss rate states of links, which reduces the extra consumption caused by blind network coding and improves the transmission performance of MPTCP.

Keywords Heterogeneous wireless networks, MPTCP, Network coding, Coding coefficients

1 引言

随着无线通信技术的快速发展,网络基础设备的部署和应用的范围越来越广,越来越多的终端设备开始配备多个网络接口^[1]。多接口网络接入技术通常采用并行多路径的数据传输方式,它不仅可以有效提高网络传输吞吐量,也可以大幅改进网络的传输性能。因此,并行多路径传输协议受到国内外学者的广泛关注^[2]。其中,具有代表性的研究成果主要包括 MPTCP^[3]、流控制传输协议(SCTP)^[4]以及基于 SCTP 扩展的并行多路径传输协议(CMT-SCTP)^[5]。虽然 SCTP 和 CMT-SCTP 可以同时利用多条链路并行传输数据,但是该协

议的部署均需调整硬件服务器和应用程序才能启用多路径传输服务。因此,SCTP 和 CMT-SCTP 没有得到广泛的应用。MPTCP 是在 TCP 的基础上扩展而来,能够有效兼容现有的网络,其主要思想是借助多接口技术聚合多条链路的带宽资源,把数据流同时分发到多条链路上进行传输,从而有效地提高网络传输性能^[3],如图 1 所示。

在异构无线网络环境中,由于链路特征差异大,基于传统传输机制的 MPTCP 无法准确地感知应用业务需求和当前的网络状态,容易引起数据包失序和丢失,使得网络资源浪费和短缺现象并存,大大降低了网络服务质量和用户体验。为解决上述问题,学术界提出大量关于调整 MPTCP 协议本身的

方案,其中包括改进数据调度机制^[6-7]以及优化重传机制^[8-9]等,以减轻数据分组的丢失和重排序等问题。这些策略虽然能够减少数据包的丢失,但是其数据包传递的本质依然遵循按序交付的原则,并不能从根本上解决数据包失序和丢失问题。

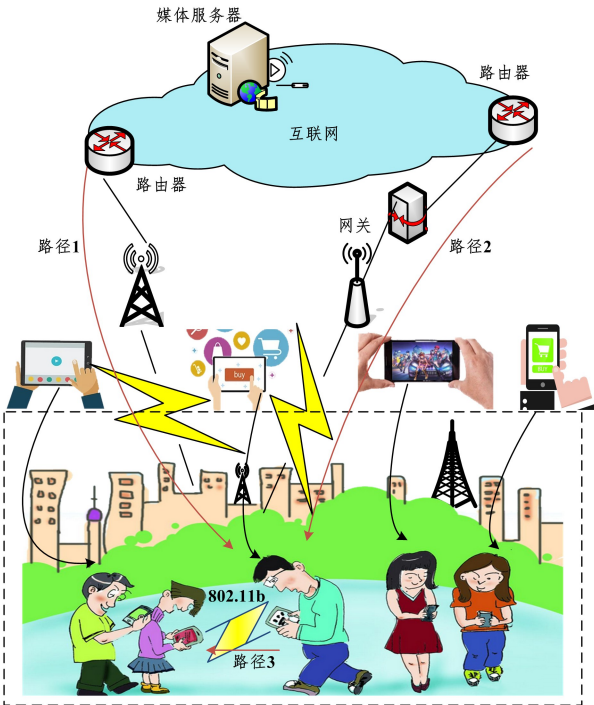


图1 基于 MPTCP 的多路传输场景(电子版为彩色)

近年来,在传输层引入网络编码的解决方案(MPTCP-NC),已经被证明是用于解决 MPTCP 数据包重排序、打破分组按序交付的有效措施^[10]。但是,现有的大部分网络编码研究工作都是假设当前网络具有网络编码的机会,研究者都在强调网络编码在提高网络传输吞吐量、减少数据重传次数、优化传输可靠性等方面带来的优点,忽视了为实现这些优点而牺牲的代价^[11-12]。在异构无线网络中,由于链路的差异性和网络的动态性,频繁地生成和计算编码系数,会增加网络编码的冗余性。因此,若网络编码不能根据当前网络状态自适应地选择网络编码策略,无疑会给 MPTCP 带来额外的网络开销:1)网络编码的操作,增加了等待网络编码机会的时间和网络解码的时间,给 MPTCP 的传输带来了额外的传输时延;2)编码操作需要额外的计算和存储资源,浪费了本已有限的带宽资源。这些额外的网络开销同带宽密集、实时性强的服务要求背道而驰,严重影响了用户的网络体验。针对网络编码理论在实际应用上的缺陷,刘外喜等^[13]提出根据网络流量自相似性的机会式网络编码方式,详细阐述了基于机会式网络编码的优点。

如前文所述,在异构无线网络中,由于编码存在时机性,网络编码需要根据网络状态有选择地执行。因此,编码时机的选择将成为未来异构无线网中网络编码优化的研究重点。在此思想的引导下,我们提出了一种基于丢包预测的选择性网络编码(MPTCP-SNC),MPTCP-SNC 的主要思路是通过探测链路丢包率特征并将其作为网络编码决策的关键指标,为网络编码的选择提供决策依据:1)当网络链路具有较大丢包率时,表明当前网络传输质量较差,MPTCP 执行网络编码操作;2)当网络链路丢包率较小甚至无丢包时,表明当前网络传输质量较好,不需要执行网络编码。我们通过 NS2 仿真

平台证实了 MPTCP-SNC 可以有效地改善网络吞吐量,减少执行网络编码带来的额外消耗,并且提高了 MPTCP 的传输稳定性。

本文第 2 节简要介绍了在不同情况下融合网络编码 MPTCP 的传输特点;第 3 节详细阐述了基于丢包预测的 MPTCP 选择性网络编码;第 4 节基于 NS2 仿真平台评估所设计的策略;最后,对本文工作进行总结和展望。

2 问题描述

在异构无线网络中,由于无线链路的差异性和网络的动态性,多路径传输协议容易引发数据包失序加重,在有限的接收缓存区下,数据包的失序会降低 MPTCP 的传输效率。近年来,学术界通过对数据包进行线性网络编码的能够解决因数据包丢失引起的失序问题,提高网络的传输效率。然而,网络编码也是一把双刃剑。当前国内外大部分对网络编码的研究^[14-16],都在强调编码操作的优点,忽视了为实现网络编码优点而牺牲的代价。图 2 对比了网络编码在 MPTCP 有链路丢包和无链路丢包情况下的传输情况。

唐曼^[17]验证了网络编码在链路丢包时的传输性能。为了更加详尽地阐述本文的设计思想,我们同样假设 MPTCP 发送端需要向接收端发送 4 个数据包(P1, P2, P3 和 P4),链路传输数据时的丢包率设置为 1/4,单向传输时延为 1 个 RTT,处理收发两端数据包的时延忽略不计。如图 2(a)所示,无网络编码时,MPTCP 发送端发送 P1-P4 4 个数据包,经过 1 个 RTT 后,假设 P1, P2, P3 成功被接收,而数据包 P4 丢失。MPTCP 接收端向发送端反馈接收信息,发送端接收到 3 次重传确认之后,确认数据包 P4 丢失并重传。此时,P4 比 P3 到达接收端的时间至少慢 2 个 RTT 时间。因此,在有丢包情况下,不执行网络编码完成 4 个数据包的传输至少需要 3 个 RTT。而通过网络编码发送 4 个数据包(如图 2(b)所示),MPTCP 需要发送 6 个数据包才能保证通过丢包率 1/4 的网络,即使发生两个数据包的丢失,MPTCP 接收端也能通过对接收到 4 个编码包的编码系数进行线性独立检验,从而成功解码出 P1-P4 4 个数据包。因此,通过网络编码完成数据包 P1-P4 的传输只需要 1 个 RTT 时间。所以,在网络发生丢包时,基于 MPTCP 的网络编码可以明显减少数据包的重传并有效提高网络传输吞吐量。

然而,上述的假设是基于当前网络具有网络编码的机会时进行的,在实际无线网络中,并不是所有的网络状况都具有网络编码的机会,也不是所有的数据传输都需要使用网络编码,才能提高网络的传输性能。图 2(c)和图 2(d)对比了链路无网络丢包时 MPTCP 网络编码在传输层的工作情况。在链路无丢包时不使用网络编码的情况如图 2(c)所示,假设在收发两端对数据包的处理忽略不计。MPTCP 发送端依次向接收端发送 P1-P4 4 个数据包,并依次被 MPTCP 接收端成功接收,此时采用无网络编码传输数据只要 1 RTT 时间。然而采用网络编码,如图 2(d)所示,MPTCP 数据包在网络链路上花费时间也是 1 RTT 时间。但是在有网络编码的操作下,MPTCP 需要在发送端增加复杂的编码系数计算,而这些操作都需要花费额外的计算时间,消耗额外的网络资源。其次,为了实现数据包的解码,接收端需要等待并收集足够多的编码系数以及对译码矩阵进行线性独立检验,这就产生了延迟和额外分组的丢失,从而降低了网络传输的效率,增加传输时

延。所以在异构无线网络中,网络编码操作也存在时机性,并不是所有的编码都能提高网络的传输效率。

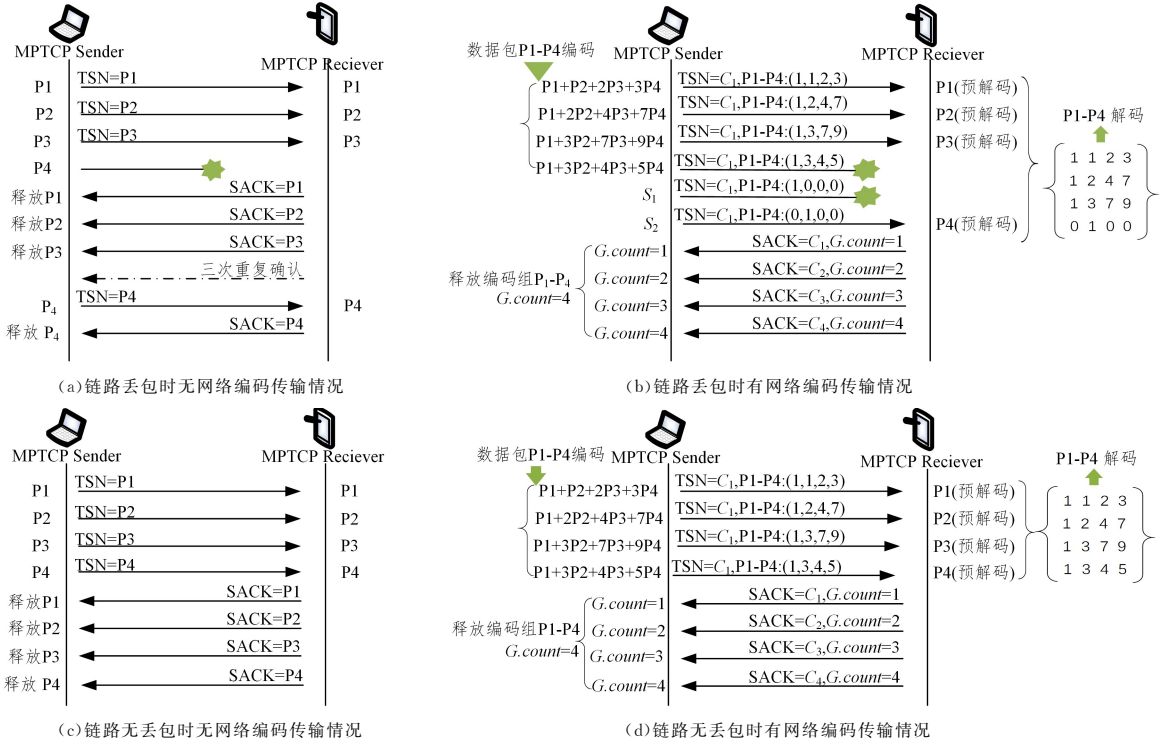


图 2 融合网络编码技术在链路有无丢包时数据传输对比

3 基于丢包预测的 MPTCP 选择性网络编码设计

如前文所述,在异构无线网络中,由于无线链路的差异性和网络的动态性,使得网络编码操作存在时机性。因此,本文通过探测 MPTCP 丢包率来判断当前网络传输质量,为 MPTCP 网络编码的决策提供判断依据:1)当网络链路具有较大丢包率时,表明当前网络传输质量较差,MPTCP 执行网络编码操作;2)当网络链路丢包率较小甚至无丢包时,表明当前网络传输质量较好,不需要执行网络编码。因此,MPTCP-SNC 的主要思想是探测网络链路丢包率,并根据丢包率预测当前网络传输质量,从而为选择性网络编码提供判断依据。

3.1 基于隐马尔可夫链的丢包率预测模型

在无线异构网络中,MPTCP-SNC 感知网络链路的数据包丢失情况后,首先根据路径有效带宽测量模型 Mathis^[18] 测量出 MPTCP 网络链路 P_i 上的有效带宽 E_{P_i} :

$$E_{P_i} = \frac{C}{RTT_{P_i} \times \sqrt{LR_{P_i}}} \quad (1)$$

其中, C 的取值一般为 $1.22 \times MSS$ (MSS 表示最大报文长度), LR_{P_i} 为路径 P_i 上测量的丢包率, RTT_{P_i} 为路径 P_i 上测量的往返时延(RTT)。其中 RTT_{P_i} 可以通过下式计算得出:

$$\begin{cases} RTT_{P_i} = \alpha \times RTT'_{P_i} + (1-\alpha) \times \sigma_{P_i} \\ \sigma_{P_i} = t_{rec} - t_{send} \end{cases} \quad (2)$$

其中, t_{send} 为 MPTCP 数据包的发送时间, t_{rec} 为 MPTCP 数据包的 ACK 确认包达到发送端的时间, RTT'_{P_i} 为路径 P_i 上当前的 RTT 值,权重参数 α 取值为 $7/8$ 。根据式(1)可以得到路径 P_i 上测量的丢包率 LR_{P_i} 的计算公式,即:

$$LR_{P_i} = \left(\frac{C}{E_{P_i} \times RTT_{P_i}} \right)^2 \quad (3)$$

基于丢包预测的选择性网络编码采集完链路的 RTT_{P_i} 和 E_{P_i} 值后,通过式(3)计算链路的丢包率得到预测样本

$LR_{P_i} = \{LR_{P_1}, LR_{P_2}, \dots, LR_{P_n}\}$ 。为了预测链路丢包率,我们采用了隐马尔可夫模型(HMM)^[19] 来预测链路丢包率的变化。HMM 是马尔可夫模型的拓展,已经被学术界证明可以用来预测链路 P_i 上丢包率的变化^[19]。为了实现 MPTCP 链路丢包率的预测,我们使用了五元组来描述 HMM 模型,即 $\lambda = (S, O, A, B, \pi)$ 。其中 A 表示状态转移矩阵模型, B 表示观测概率矩阵模型, S 为隐含状态模型, O 为观测状态模型, π 为初始概率矩阵模型。

为了提高预测的准确性,MPTCP-SNC 根据 MPTCP 网络链路的负载情况从高到低对隐含状态 S 进行划分,即 $S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$ ^[20]。经过多次仿真实验及结果分析,我们将观测状态 O 根据链路采集的丢包率进行划分,即 $O = \{O_1, O_2, \dots, O_{10}\}$,表 1 给出了观测状态 O 和链路丢包率的对应关系。基于隐马尔可夫链的丢包率预测模型,如算法 1 所示。

算法 1 基于隐马尔可夫链的丢包率预测

Definition: RTT_{P_i} 为链路 P_i 的传输时延; LP_{P_i} 为链路 P_i 的传输丢包率; \overline{LR}_{P_i} 为路径 P_i 的丢包率预测值; $\zeta_i(i, j)$ 为给定模型从 t 时刻状态 S_i 转成 $t+1$ 时刻状态 S_j 的数学期望; $\overline{a_{ij}}$ 为任意时刻下状态 q_i 在下一时刻为 q_j 的概率; $\overline{b_j(k)}$ 为任意时刻 t 在状态 q_i 下,生成观测值 Q_i 的概率

- function HMM_basedLossRatePredictor()
- Detect RTT_{P_i} and LP_{P_i} //链路时延和丢包率测量
- Read the training data (HMM-based $\lambda = (S, O, A, B, \pi)$)
- set $S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$
- set $O = \{O_1, O_2, \dots, O_{10}\}$
- for each state S from 1 to N //HMM 模型初始化
- initialize $\pi = \{\pi_i, i=1, 2, 3, 4, 5, 6\}$
- while(the value of π, A and B is not best) //通过循环训练得出 π, A 和 B 的值

9. $\zeta_t(i, j) = \frac{\alpha_t(i) a_{ij} b_j(O_{t+1}) \beta_{t+1}(j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_t(i) a_{ij} b_j(O_{t+1}) \beta_{t+1}(j)}$
10. $r_t(i) = \sum_{j=1}^N \zeta_t(i, j) = P(S_t = S_i | O, \lambda)$
11. $\bar{\pi} = r_1(i)$ //使用数学期望模型计算 π, A 和 B 的值
12. $\bar{a}_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^T \zeta_t(i, j)}{\sum_{t=1}^T r_t(i)}$ and $\bar{b}_j(k) = \frac{\sum_{t=1, O_t=k}^T r_t(j)}{\sum_{t=1}^T r_t(j)}$
13. Based on Viterbi to terminate step
14. $\bar{S}_{t+1} = \arg \max(a_{s_{t-1}, j}, 1 \leq j \leq 6$ //预测路径下一时刻的状态
15. $\bar{LR}_{P_i} = \arg \max(b_{\bar{s}_i}(k), 1 \leq k \leq 10$ //预测下一时刻的丢包率
16. return \bar{LR}_{P_i}

3.2 基于隐马尔可夫链的丢包率预测模型

基于丢包预测的选择性网络编码算法通过利用隐马尔可夫模型预测 MPTCP 在传输过程中下一时刻的链路丢包率,为 MPTCP 协议在异构网络中网络编码时机的选择提供判断依据。因此,定义了一个基于链路丢包率的选择网络编码的判断公式:

$$\begin{cases} \text{Using Network Code,} & \overline{LR}_{P_i} \geq N \\ \text{Without Network Code,} & \overline{LR}_{P_i} < N \end{cases} \quad (4)$$

表1 观测状态和链路丢包率的对应关系

观测状态编号	MPTCP 链路丢包率对应区间
O_1	$[0, 0.5\%)$
O_2	$[0.5\%, 1\%)$
O_3	$[1\%, 2\%)$
...	...
O_{10}	$[5\%, 100\%)$

其中, \overline{LR}_{P_i} 为基于隐马尔可夫模型预测出的链路丢包率, 阈值 N 为 MPTCP 程序在实际传输过程中可容忍的链路丢包率, 在研究过程中可根据实际网络服务中的传输质量和用户体验需求设置。由于网络编码需要在收发两端增加了复杂的编码解码运算, 这些操作带来了额外的计算和资源消耗, 增加了网络的传输时延, 当 $\overline{LR}_{P_i} < N$ 时, 表明当前链路丢包很小甚至没有数据丢失, 此时不使用网络编码可以实现更好的网络传输性能, 如图 3 所示。根据判断公式, 我们给出以下定义:

- 1) 丢包率 $\overline{LR}_{P_i} < N$ 时, 表明当前链路丢包率很小甚至没有数据包的丢失, 不使用网络编码能实现更好的网络性能;
- 2) 丢包率 $\overline{LR}_{P_i} \geq N$ 时, 表明当前链路负载较高, 使用网络编码可以降低数据包的丢失和重传, 提高 MPTCP 的传输效率和性能。

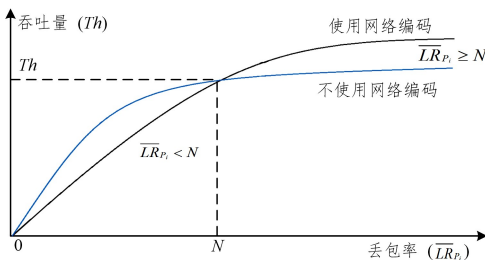


图3 网络编码在不同链路丢包率时的性能对比

通过式(4)来判断当前网络状态是否需要编码, 为选择性网络编码机制提供决策依据。基于丢包预测的网络编码选择机制的具体步骤如下:

- 1) 感知并计算 MPTCP 链路时延和丢包率。
- 2) 根据步骤 1) 测量的丢包率样本初始化 HMM 参数 π, A 及 B 。
- 3) 采用 Baum-Welch 算法对 HMM 模型进行迭代训练, 得到 HMM 模型的最佳参数 π, A 及 B 。
- 4) 借助 Viterbi 算法预测下一时刻的隐含状态, 计算下一时段内的丢包率 \overline{LR}_{P_i} 。
- 5) 根据式(4)判断是否进行网络编码。若 $\overline{LR}_{P_i} < N$, 则不使用网络编码; 若 $\overline{LR}_{P_i} \geq N$, 则进行网络编码。
- 6) 若数据发送完毕, 分发结束。

算法2 基于丢包预测的网络编码选择机制

Definition: RTT_{P_i} 为链路 P_i 的传输时延; LP_{P_i} 为链路 P_i 的传输丢包率; \overline{LR}_{P_i} 为路径 P_i 的丢包率预测值

When the send buffer is idle and can send packets

1. Detect RTT_{P_i} and LP_{P_i} ;
2. Compute HMM π, A and B ;
3. HMM-based Predict ;
//当前网络状态是不可靠传输, 要进行网络编码
4. if ($\overline{LR}_{P_i} < N$) then
5. Transferred to Coding Cache from regular queue
6. Network coding;
7. Path sorting and switching based packet loss rate;
8. Send packet;
9. else //说明当前网络状态是可靠传输, 不进行网络编码
10. Path sorting and switching based packet loss rate;
11. Send packet;
12. end if

4 仿真评估

4.1 仿真拓扑配置

为了评估本文所提出的 MPTCP-SNC 的传输性能, 我们使用了目前学术界广泛使用的 NS2 平台进行网络仿真实验^[21]。如图 4 所示, 仿真拓扑由 MPTCP 发送端和接收端组成, 收发两端同时连接两条独立的链路(路径 1 和路径 2), 每条链路具备相同的配置参数, 带宽值设置为 10 Mbps, 时延为 10 ms, 并使用了标准的 WiFi/IEEE 802.11b 接口。同时, 为了更好地评估网络编码在不同链路丢包率时的性能, 我们将 MPTCP 传输链路的丢包率随机设置在 0.1%~10% 之间, 仿真时间为 60 s。

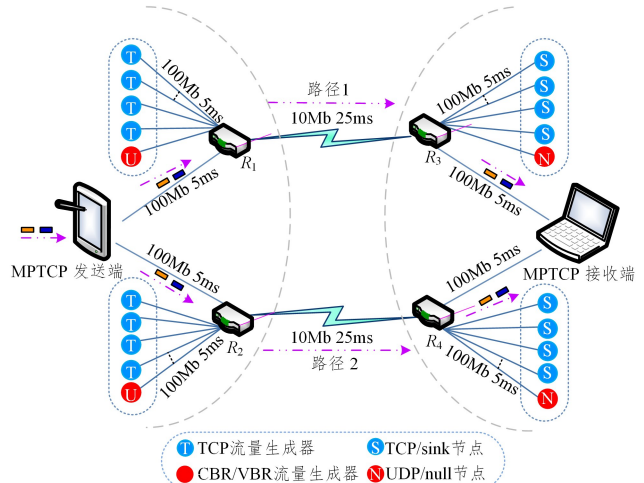


图4 仿真拓扑图

根据我们先前的研究发现^[8],在异构无线网络中,互联网总流量中具有约 17%~20% 的 UDP 背景流和约 80%~83% 的 TCP 背景流,这些突发特性的网络背景流给 MPTCP 在实际网络中带来了复杂的影响。因此为了更真实地反映 MPTCP-SNC 在实际网络中的优势,我们给每个路由器节点添加了 1 个 UDP 流量生成器和 4 个 TCP 流量生成器,以获得 20% 的 UDP 流量和 80% 的 TCP 流量,表 2 给出了网络背景流关键的实验参数。

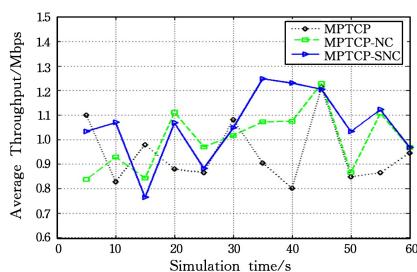
表 2 仿真参数配置

变量	值
Traffic/VBR set rate_/kB	448
Traffic/VBR set random_	0
Traffic/VBR set maxpkts_	268 435 456
Traffic/VBR set maxSize_	200
Traffic/VBR set minSize_	100
Traffic/VBR set intervaltime_	200

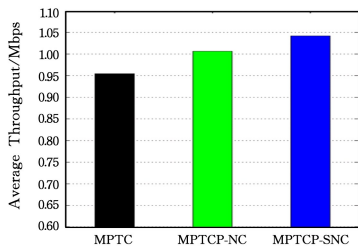
4.2 仿真结果分析

(1) 平均吞吐量分析

平均吞吐量是网络中传输的数据量总和的平均,是衡量网络传输性能的重要参数之一,研究者通常使用这个参数来判断所设计的算法和协议的传输性能。图 5 显示了 3 种协议(MPTCP, MPTCP-NC 和 MPTCP-SNC) 的吞吐量性能的变化。



(a) 平均吞吐量变化



(b) 总平均吞吐量对比

图 5 平均吞吐量对比

从图 5(a) 中可以看出,使用网络编码的 MPTCP-NC 和 MPTCP-SNC 比标准的 MPTCP 传输性能更好。从图 5(b) 中可以明显看出,MPTCP-SNC 获得的平均吞吐量最高,比 MPTCP 和 MPTCP-NC 分别高出 9.13% 和 3.49%。这是因为 MPTCP-SNC 可以根据网络状况选择性地执行网络编码,当链路的丢包率较小甚至无丢包时使用标准的 MPTCP 数据调度策略,有效地减少了网络编码额外消耗,提高了 MPTCP-SNC 的数据传输的可靠性。

(2) 平均时延分析

平均时延是衡量网络传输速率的重要参数之一。如图 6 所示,MPTCP-SNC 的平均传输时延明显低于 MPTCP-NC,略高于标准的 MPTCP。这是因为在 MPTCP 中执行网络编码需要额外的编码解码时间和计算时间,而 MPTCP-SNC 根

据网络链路丢包情况预测下一时刻的链路状态,实现了网络编码的选择性执行,减少了网络编码的执行时间,提高了 MPTCP 的传输速率。

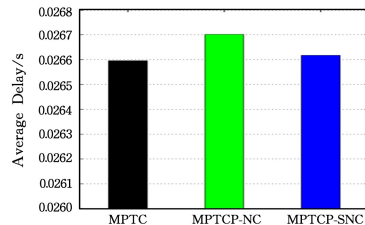


图 6 平均时延对比

(3) 抖动分析

网络传输的抖动值通常用来判断分组传输期间的稳定性。图 7 给出了 3 种传输机制在 t 为 0~60 s 之间的平均抖动值变化状况。从图中可以看出,使用网络编码传输数据可以有效减少数据包的重排序,提高了 MPTCP 的传输稳定性。而 MPTCP-SNC 通过选择性的执行网络编码,有效地利用了网络资源,减少了额外的网络资源消耗,实现了更加稳定的传输性能。

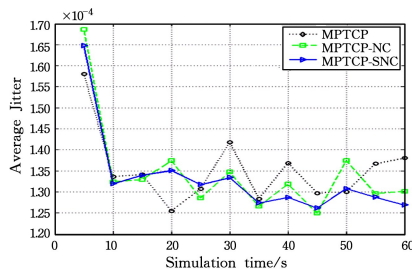


图 7 抖动值变化对比

(4) 信噪比峰值分析

在异构无线网络中,移动流媒体服务将成为未来移动互联网中的核心业务,因此我们研究了在异构无线网络中使用网络编码进行流媒体数据传输的性能。该性能是通过峰值信噪比(PSNR)^[23]来测量的,即根据式(5)将网络传输吞吐量和丢包率影响转化为用户感知的体验质量。

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{MAX_Bitrate}{\sqrt{(EXP_Thr - CRT_Thr)^2}} \right) \quad (5)$$

其中,MAX_Bitrate 表示传输数据流的最大比特率,EXP_Thr 表示预期的平均吞吐量,CRT_Thr 表示在网络传输中实际的平均吞吐量。

如图 8 所示,本文所提出的 MPTCP-SNC 在异构无线网络流媒体业务传输服务中,MPTCP-SNC 的 PSNR 值比传统的 MPTCP 和 MPTCP-NC 均高出约 3%,为用户提供了更好的流媒体传输服务体验。

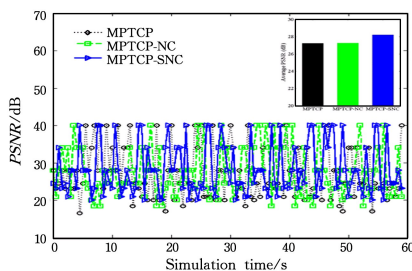


图 8 PSNR 值对比

结束语 本文在参考已有的 MPTCP 网络编码算法的基础上,根据未来异构多路径流媒体等系统将出现的数据传输需求,提出了基于丢包预测的 MPTCP 选择性网络编码策略 MPTCP-SNC。该策略充分考虑了异构无线网络环境的差异性,允许 MPTCP 根据链路丢包率情况选择性执行网络编码,解决了在异构无线网中数据包丢失和失序的传输问题,并进一步的提高了 MPTCP 的数据传输效率。仿真结果表明,MPTCP-SNC 较不区分网络状况的 MPTCP 网络编码算法,明显提高了网络的传输性能,降低了传输时延,并提升了整体数据的传输效率和可靠性。

本文所涉及的研究是基于学术界广泛使用的 NS2 网络仿真平台完成的。为了进一步验证基于丢包预测的 MPTCP 选择性网络编码在实际网络中的性能,我们在未来的工作中,将在真实的网络环境中实现本文的设计思路,并根据计算得到的所有链路的平均吞吐量、平均时延以及丢包率等来分析 and 评估 MPTCP 协议的数据传输性能,为基于丢包预测的 MPTCP 选择性网络编码网络中的实际部署和应用提供更好的思路。

参 考 文 献

- [1] DONG P, YANG W, TANG W, et al. Reducing transport latency for short flows with multipath TCP[J]. *Journal of Network & Computer Applications*, 2018, 108(4): 20-36.
- [2] CAO Y, LIU Q, ZUO Y, et al. Receiver-centric Buffer Blocking-aware Multipath Data Distribution in MPTCP-based Heterogeneous Wireless Networks[J]. *Ksii Transactions on Internet & Information Systems*, 2016, 10(10): 4642-4660.
- [3] LEE J, PARK H. Method of reliable MPTCP [C]//2018 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). Korea (South), 2018: 488-491.
- [4] CAO Y, SONG F, LIU Q, et al. A LDDoS-Aware Energy-Efficient Multipathing Scheme for Mobile Cloud Computing Systems[J]. *IEEE Access*, 2017, 5(99): 21862-21872.
- [5] SONG J, DONG P, ZHOU H, et al. A Performance Analysis Model of TCP over Multiple Heterogeneous Paths for 5G Mobile Services[J]. *Sustainability*, 2018, 10(5): 1337.
- [6] CAO Y, SONG F, LUO G, et al. (PU)2M2: A potentially underperforming-aware path usage management mechanism for secure MPTCP-based multipathing services[J]. *Concurrency & Computation Practice & Experience*, 2018, 30(3): 1-11.
- [7] LIU Y, NERI A, RUGGERI A, et al. A MPTCP-Based Network Architecture for Intelligent Train Control and Traffic Management Operations[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, PP(99): 1-13.
- [8] ZENG J, CAO Y, KE F, et al. Performance evaluation of secure multipath retransmission mechanism in next generation heterogeneous communication systems[J]. *IET Networks*, 2018, 7(2): 61-67.
- [9] XUE K, HAN J, NI D, et al. DPSAF: Forward Prediction Based Dynamic Packet Scheduling and Adjusting With Feedback for Multipath TCP in Lossy Heterogeneous Networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(2): 1521-1534.
- [10] CLOUD J M, CALMON F D P, ZENG W, et al. Multi-Path TCP with Network Coding for Mobile Devices in Heterogeneous Networks[C]// *Vehicular Technology Conference*. IEEE, 2013.
- [11] ZHONG X, QIN Y, LI L. TCPNC-DGSA: Efficient Network Coding Scheme for TCP in Multi-hop Cognitive Radio Networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 84(2): 1243-1263.
- [12] 王振朝, 蔡志杰, 薛文玲. 一种基于部分网络编码的无线网络机会路由算法[J]. *计算机科学*, 2016, 43(9): 152-155, 174.
- [13] 刘外喜, 余顺争, 高鹰, 等. 基于预测的机会式网络编码[J]. *通信学报*, 2013(4): 36-46.
- [14] GHEORGHU, TOLEDO, RODRIGUEZ. Multipath TCP with Network Coding for Wireless Mesh Networks[C]// *IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2010.
- [15] QIN Y, ZHONG X, YANG Y, et al. TCPJGNC: A transport control protocol based on network coding for multi-hop cognitive radio networks[J]. *Computer Communications*, 2016, 79: 9-21.
- [16] AGENEAU P L, BOUKHATEM N. Multipath TCP over network coding for wireless networks[C]// *Consumer Communications & Networking Conference*. IEEE, 2017.
- [17] 唐曼. 无线环境下基于网络编码的并行数据传输技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- [18] ZENG J, KE F, ZUO Y, et al. Multi-attribute Aware Path Selection Approach for Efficient MPTCP-based Data Delivery [J]. *Journal of Internet Services and Information Security*, 2017, 7(1): 28-39.
- [19] LI G, LIU Q, BAI S. A novel model to improve network performance[J]. *International Journal of Computers & Applications*, 2018, 40(2): 82-87.
- [20] 田波, 杨宜民, 蔡述庭. 基于丢包率预测的视频传输纠错算法[J]. *计算机应用研究*, 2014, 31(4): 1135-1137.
- [21] BERKELEY C, LBL, USC/ISI and Parc X, NS-2 documentation and software, version 2. 35 [EB/OL]. <http://www.isi.edu/nsna/ns>.
- [22] LIN C H, SHIEH C K, KE C H, et al. An adaptive cross-layer mapping algorithm for MPEG-4 video transmission over IEEE 802.11e WLAN[J]. *Telecommunication Systems*, 2009, 42(3/4): 223.