

MSC 中基于 SDN 的拓扑感知 RLNC 重传方案

姚玉坤*, 任丽丹, 任智, 冯鑫, 杜文正

(重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要: 为了将小蜂窝中的网络拓扑信息应用于网络编码重传过程,从而有效减少重传次数、提高系统吞吐量,提出了一种移动小蜂窝(mobile small cell, MSC)中基于软件定义网络(software defined network, SDN)的拓扑感知随机线性网络编码(random linear network coding, RLNC)重传方案(topology-aware RLNC retransmission scheme SDN based in MSC, TRRS)。首先,为了收集网络拓扑信息,设计 SDN 控制器端口设备映射表;其次,依据拓扑信息选择最佳编码包用于重传;最后,通过 TRRS 算法将网络拓扑信息嵌入编码重传过程。仿真结果表明,相比于现有的 SDN 与网络编码相结合的协议,TRRS 方案减少了重传次数,增加了网络的弹性和吞吐量。

关键词: 软件定义网络; 网络编码; 重传; 拓扑感知

中图分类号: TP 393

文献标志码: A

DOI:10.12305/j.issn.1001-506X.2022.04.38

Topology-aware RLNC retransmission scheme based on SDN in MSC

YAO Yukun*, REN Lidan, REN Zhi, FENG Xin, DU Wenzheng

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of
Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to apply the network topology information in the small cell to the retransmission process of network coding, thereby effectively reducing the number of retransmissions and increasing the system throughput, a topology-aware random linear network coding (RLNC) retransmission scheme software defined network (SDN)-based in mobile small cell (MSC) (TRRS) is proposed. First, in order to collect network topology information, design the SDN controller port device mapping table. Next, select the best coded packet for retransmission according to the topology information. Finally, use the TRRS algorithm to embed the network topology information in the code retransmission process. The simulation results show that, compared with the existing SDN and network coding protocol, the TRRS scheme the number of retransmissions and increases the flexibility and throughput of the network.

Keywords: software defined network (SDN); network coding (NC); retransmission; topology-aware

0 引言

由于 5G 网络的高速率和大容量需求,传统的网络结构和技术面临重大挑战,例如:缺少网络整体拓扑可能会导致效率降低和特定路径上的拥塞^[1],同时,由于无线信道易受干扰等因素,会导致数据包的不必要重传而浪费网络资源。

面对日益增长的移动数据流量,移动小蜂窝(mobile small cell, MSC)^[2]成为 5G 蜂窝网络中处理海量数据的有效解决

方案之一^[3]。与传统的静态小蜂窝^[4]不同,首先,MSC 可以根据动态业务负载以高效、经济的方式进行部署,以补充宏蜂窝覆盖漏洞并增强其服务范围^[5]。其次,MSC 可以移动到更靠近用户设备(user equipments, UEs)的位置,以便 UEs 接收更强的信号,获得更高的数据速率。最后,采用 MSC 可以真正从宏蜂窝释放更多的流量^[6-7],从而提高系统性能。同时为了更好地适应网络数据流量激增,在 5G 中引入软件定义网络(software defined network, SDN)^[8],将

收稿日期:2020-12-28; 修回日期:2021-02-20; 网络优先出版日期:2021-05-19。

网络优先出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20210519.1024.002.html>

基金项目:国家自然科学基金(61971080)资助课题

* 通讯作者。

引用格式:姚玉坤,任丽丹,任智,等. MSC 中基于 SDN 的拓扑感知 RLNC 重传方案[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(4): 1393-1400.

Reference format: YAO Y K, REN L D, REN Z, et al. Topology-aware RLNC retransmission scheme based on SDN in MSC[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(4): 1393-1400.

用户面和控制面分离,由不同的网络节点承载。此外,为应对通信链路传输中丢包导致的重传问题,引入网络编码(network coding, NC)^[9]在转发数据包之前对其进行编码、重组;其中,随机线性 NC(random linear NC, RLNC)^[10-11]以其随机选取编码系数和中间节点无需解码即可重新编码分组等特性,被广泛应用。SDN 和 NC 的应用与结合极大地促进了 5G 蜂窝网络的管理和运营^[12]。

在传统的网络中实现 NC 的主要挑战为在分布式环境中建立编码路径和在路由器中添加 NC 的相关功能^[13],然而 SDN 以其全局网络拓扑和 OpenFlow^[14]提供的访问交换机流表的接口,使 SDN 与 NC 的结合成为可能,并且逐渐引起诸多学者的关注。最早将 NC 和 SDN 技术相联系的是 Felician^[15]提出的 OpenFlow,已经成为网络革新的关键技术和驱动力。但是,该研究并没有将 NC 与 SDN 结合,仅仅考虑到 OpenFlow 面临的各种流中,可能存在由 NC 产生的数据流,并且,该研究只考虑了蝶形网络,而非随机的实际网络拓扑。Liu 和 Hua^[16]提出的在 SDN 上实现 NC 框架(framework for realizing network coding over SDN, NCoS)不单单将 NC 作为一种服务融合到 SDN 中,而是将 NC 的功能添加到 SDN 控制器和交换机中,真正意义上实现了二者的结合。文献[17]从概念上进一步融合 NC 与 SDN,探讨了二者的结合对 5G 传输存储网络的重要性——SDN 技术带来的灵活性和 NC 对于网络容量的高效利用,成为 5G 时代必不可少的关键技术。随后, Yang 等^[18]利用现有的编码策略,结合服务质量(quality of service, QoS)需求,提出了一种在 OpenFlow 协议中使用 NC 的框架(framework to enable networking coding in openflow protocol, NC-OF),推进了 NC 与 SDN 相结合的研究工作。在此基础上, Di 等^[19]为提高网络性能,制定了合理的 NC 策略,提出了基于 SDN 的 NC 架构(SDN-based network coding architecture, SDNC)。考虑到 SDN 网络中的预约多播式流量等问题,刘道桂^[20]提出了一种可保证指定多播速率的网控编码节点选取算法(network orchestrated coding nodes selection, NOCNS),还在寻找流间编码条件下提出了 SDN 中一种面向流的协作编码(flow-oriented collaborative coding, FCC)算法。Leyva 等^[21]为减轻长期演进技术升级版(longterm evolution advanced, LTE-A)中基站的负担,同时提高吞吐量和能量增益,有效地进行大规模内容分发,提出了一种 NC 协作(network-coded cooperation, NCC)协议,相较于之前均未涉及任何网络架构的研究而言,该研究虽是在 LTE-A 中展开,但未将 SDN 拓扑发现等功能融入其中。

综合前述工作可以发现,一部分未涉及到任何网络架构,另一部分没有深层次的、基于拓扑与流量特征的协同编码。为了更好地将 NC 和 SDN 技术的优势在 5G 蜂窝网络中有机融合、相互促进,本文提出了一种 MSC 中基于 SDN 的拓扑感知 RLNC 重传机制(topology-aware RLNC retransmission scheme SDN-based in MSC, TRRS),贡献如下:

(1) 为 SDN 控制器设计端口设备映射表,用于构建全

局网络拓扑。

(2) 根据拓扑信息选取最佳编码包为来自同一 MSC 中丢失数据包的线性组合,并且给出了最佳编码数据包格式。

(3) 提出了基于拓扑信息的 RLNC 重传方案,该方案分为 4 步:报告丢失数据包、生成网络拓扑、生成最佳编码包、传输最佳编码包。相比于传统的 RLNC,该方案有效地减少了重传次数,增加了网络的吞吐量和弹性,降低了传输能耗。

1 网络架构及问题分析

1.1 网络场景描述

在 5G 蜂窝系统中, MSC 在维持网络连接性、满足时空变化流量需求的同时,为 UEs 提供更好的蜂窝 QoS^[3],并且使系统吞吐量得到很大提升。

SDN 作为一种全新的组网设计思想,通过将网络的控制与转发分离,构建开放可编程的网络体系架构。OpenFlow 是连接 SDN 控制层和转发层的协议,为网络控制层操作转发层的路由器、交换机等设备提供链路通道^[22]。

基于 SDN 的 MSC 无线异构网络架构^[23]如图 1 所示,以应用 OpenFlow 协议为基础,其基本架构主要由核心网、无线接入网、移动终端 3 部分组成,①其中,核心网主要由核心网 OpenFlow 控制器(core network OpenFlow controller, NOFC)和核心网 OpenFlow 协议网关(core network openflow gateway, NOFG)组成;对于每一个无线接入网都包含 1 个无线网 OpenFlow 控制器(radio network OpenFlow controller, ROFC)和各类网络无线接入接口(network radio access interface, NRAI);移动终端具备多种无线接入接口可以同时连接不同网络。各部分内的网元设备均支持 OpenFlow 协议,从而利用 SDN 技术增加网络弹性,促进各类无线网络的融合。

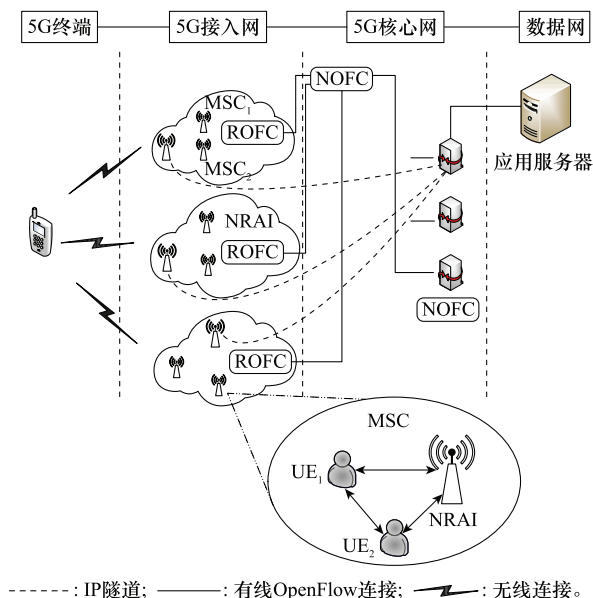


图 1 基于 SDN 的 MSC 无线异构网络架构图

Fig. 1 SDN-based MSC wireless heterogeneous network architecture diagram

1.2 问题分析

在图 1 所示的网络场景中,每个 UE 都会接收到应用服务器下发的数据包,但由于环境等影响,UEs 可能会丢失不同的数据包,因此产生编码机会,若采用传统的 RLNC,则所有丢失的数据包将随机组合,并且随机传输给 NRAI,从而导致大量冗余数据包的传输,浪费网络资源。若将网络拓扑信息融合到 RLNC 的编码过程中,则可以根据拓扑信息选取特定的丢失数据包进行组合,并且传输给特定的 NRAI,有效减少数据包的重传次数。

2 系统模型

本节将描述本方案采用的系统模型,并陈述 RLNC 数据包重传方法。

2.1 系统模型

在图 1 所示的网络场景中,内容分发发生在两个阶段:蜂窝阶段和 TRRS 阶段。

(1) 蜂窝阶段

首先将 NRAI(主要是 LTE 网中的 eNodeB,简称为 eNB,3G 中 NodeB 简称为 NB,Wi-Fi 的 AP 等)^[24-26]从服务器中请求到的内容进行分组,每组包含 G 个数据包, $\mathbf{P} = \{\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3, \dots, \mathbf{P}_G\}$,用 \mathbf{P}_i ($0 \leq i \leq G$) 来表示第 i 个数据包,进而将 G 个数据包传输给蜂窝内的 m 个 UEs。由于信道干扰等因素,蜂窝阶段传输会存在丢包,因此为每个 UE 设置了一个接收数据包索引 \mathbf{P}^* ,用于定义第 k 个 UE 接收到的数据包的顺序:

$$\mathbf{P}_k^* = \{i \in z_+ \mid i \leq m\}, 0 < k \leq m \quad (1)$$

(2) TRRS 阶段

各 UE 向该 MSC 中的 NRAI 发送丢包报告,NRAI 进而将报告传输给 SDN 控制器,其根据接收到的报告生成网络拓扑,并根据丢失的数据包确定最佳编码包组合,进而传输给服务器生成最佳编码包,并将其发送到目标 NRAI,再广播给 MSC 中的 UEs,最后各 UE 根据接收到的编码包与缓存的数据包解码得到原始数据包。

2.2 分析模型

定义 1 数据类型

在传输过程中,将数据包 P_i 按照是否被成功接收分为以下两种。

R_i : UEs 成功接收的数据包 P_i ;

L_i : UEs 未接收到,在传输中丢失的数据包 P_i 。

每个 UE 通过报告将有关数据包以及拓扑信息通知给应用服务器,服务器根据接收到的报告生成编码包 C_i 用于重传, C_i 根据是否即时可解分为以下 3 种。

τ_1 不可即时解码数据包: C_i 包含多个 L_i ;

τ_2 即时可解码数据包: C_i 仅包含一个 L_i 或者 τ_1 中独立线性数据包的数量等于 C_i 的数量;

τ_3 冗余数据包: C_i 不包含任意一个 L_i 。

结合基于 SDN 的 MCS 无线异构蜂窝网络的场景定义。

C_B 最佳编码包:来自于同一 MSC 中丢失数据包的线性组合,即同一 NRAI 传输的编码包。

主要目的为减少数据包的重传次数 R ,表示每个 UE 可以解码所有丢失的数据包之前,应用服务器发送的 C_B 的总数,此处假设 $L_i \neq \emptyset, \forall P_i \in P$ 。因此,分析模型的重点在于找到 C_B 的传输次数 R_i 。

定义 2 C_B 数量

蜂窝阶段结束后,定义 G_i 为每个 UE 接收到的原始数据包数量;在 TRRS 阶段,从服务器中传输的 C_B 的数量为 R , n 为网络中 NRAI 的数量。基于此,在期望的传输可靠性为 σ 的情况下,将 R^* 定义为应用服务器需要传输的最少的 C_B 数量,即

$$R^* \triangleq \min\{R \mid \sigma \leq F_R(R; n)\} \quad (2)$$

式中: F_R 为 R 的累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)^[25]; σ 为 F_R 的阈值,其值需根据应用程序内容分发的需求进行选取。

将 R_i 定义为传输给每个 NRAI 的 C_B 的数量,NRAI 的索引值为 i ,总数为 n ,一代的大小为 G :

$$R = \sum_{i=1}^n R_i \quad (3)$$

将 $\{S_R^i\}$ 定义为随机过程,表示第 i 个 MSC 中 NRAI 编码矩阵的秩,其取值为 $r = \{0, 1, \dots, G\}$,则当 $R_i = 0$ 时,表示蜂窝阶段传输结束, $\{S_0^i\}$ 表示第 i 个 NRAI 在 TRRS 阶段开始时编码矩阵的秩,当链路丢包率为 ϵ 时, $\{S_0^i\}$ 的概率质量函数^[25](probability mass function, PMF)为

$$P_{S_0^i}(r; i) = \Pr[S_0^i = r] = \binom{G}{r} (1 - \epsilon)^r \epsilon^{G-r} \quad (4)$$

R_i 也可定义为第 i 个 NRAI 的编码矩阵满秩需要 C_B 的数量,则 R_i 的 CDF 为

$$F_R(R; i) \triangleq P_{S_R^i}(G; i) = \Pr[S_R^i = G] \quad (5)$$

基于此,可得 R 的 CDF 为

$$F_R(R) \triangleq \min F_R(R; i) \quad (6)$$

显然地,对任意 $F_R(R; i)$ 均满足 $F_R(R; i) \geq F_R(R)$ 。进一步来讲,必然存在解码出整数数据包最低概率的 NRAI 表示为 i_0 满足 $F_R(R; i_0) = F_R(R)$,因此:

$$R^* \triangleq \min\{R \mid \sigma \leq F_R(R; i_0)\} \quad (7)$$

2.3 RLNC 分组重传

RLNC 数据包重传,即使用 RLNC 组合多个丢失的数据包,在服务器中编码 k 个重传的数据包可以表示为

$$C = \beta_1 P_1 + \beta_2 P_2 + \dots + \beta_k P_k = \sum_{i=1}^k \beta_i P_i \quad (8)$$

式中:编码系数矩阵 β 是从随机域 $F(2^8)$ ^[9-11] 中选取的。

RLNC 平均数据包重传次数为

$$R_{\text{RLNC}} = \frac{R^*}{1-\epsilon}$$

(9)

3 TRRS 最佳编码包重传方案

首先分析利用 MSC 中基于 SDN 的拓扑信息如何减少编码包的传输次数,在此基础上,详细介绍所提出的 TRRS 最佳编码包重传方案及算法。

3.1 理论分析

在蜂窝阶段结束后每个 UE 接收到一定数量的数据包,并且将其丢失数据包信息报告给 NRAI,考虑如下情形:MSC₁ 中的 eNB 接收到报告,UE₁ 丢失数据包 P₁,UE₂ 丢失数据包 P₂;MSC₂ 中的 AP 接收到报告,UE₃ 丢失数据包 P₃,UE₄ 丢失数据包 P₂;则在服务器中丢失数据包有 4 种可能的组合:P₁+P₂+P₃、P₁+P₂、P₂+P₃、P₁+P₃。若服务器发送 P₂+P₃ 给 eNB、P₁+P₂ 给 AP,则 UE₁ 无法接收到 P₁、UE₃ 无法接收到 P₃,从而导致更多的重传;以上假设情况忽略了拓扑信息,由拓扑情况可知:eNB 的最佳编码数据包组合为 P₁+P₂ 或者 P₁+P₂+P₃,AP 的最佳编码数据包组合为 P₂+P₃ 或者 P₁+P₂+P₃,因此,若对于每个 eNB 和 AP 发送最佳编码包,则只需要重传一次即可使所有 MSC 中的 UEs 接收到全部的数据包,从而减少重传次数。

相较于此,在传统未知拓扑情况下的 RLNC 中,每种编码数据包等概率出现,对于每个 NRAI 来说,接收到最佳编码数据包的概率均为 0.5,因此所有 UEs 恢复丢失数据包所需的平均重传次数为 $R=(0.5 \times 2+0.5 \times 1) \times 2=3$ 次。

由以上分析可得,在已知网络拓扑信息的情况下,应用服务器为每个 NRAI 发送最佳编码数据包,可以减少传输次数,提高系统的吞吐量。

3.2 TRRS 方案设计

图 2 为系统架构,包括应用服务器、NOFG^[27]、SDN 控制器、NRAI、UEs。

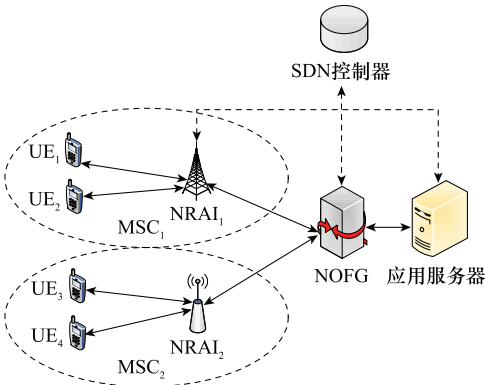


图 2 系统架构
Fig. 2 System architecture

TRRS 算法:

(1) 报告丢失数据包

在蜂窝阶段,NRAI 将服务器发送的 G 个数据包传输给其所属 MSC 中的 UEs,每个 UE 将其丢失数据包信息报告给其蜂窝内的 NRAI,丢失报告包含:UE 的 MAC-ID、丢失的数据包索引值。

(2) 生成网络拓扑

由于在 SDN 控制器中包含具有路由计算、状态监测、拓扑发现等功能的模块,因此,网络拓扑信息在 SDN 控制器中生成。MSC 中的 NRAI 通过 OpenFlow 协议与 SDN 控制器进行通信,NRAI 将其接收到的丢包报告连同该 NRAI 的 IP 地址和端口号信息通过数据流传输给 NOFG,通过控制流在 SDN 控制器中生成网络拓扑,并且将对应于每个 NRAI 最佳数据包的组合信息附加到丢包报告中发送给应用服务器。由于在移动 UEs 切换到新的 MSC 之前,网络拓扑保持不变,因此,端口设备映射信息仅包含在第一个丢包报告中。

(3) 生成最佳编码包

当应用服务器接收到包含丢失数据包、端口设备映射信息、最佳数据包组合的报告后,根据网络拓扑信息,采用 RLNC 编码方式对数据包进行编码,生成最佳编码包。在此,我们将最佳编码包头根据需要设置为如图 3 所示的内容,并将最佳编码包头放在 IP 数据包头后,传输层包头前生成最佳编码包,如图 4 所示。

0	7	11	15	31
头部长度	编码类型	有限域大小	最佳编码包数量	
最佳编码包索引				
编码向量				

图 3 最佳编码包头
Fig. 3 Best encoding header

20字节	12字节	20字节	X字节
IP首部	最佳编码包头	TCP/UDP首部	TCP/UDP报文段数据部分

图 4 最佳编码包
Fig. 4 Best encoding package

(4) 传输最佳编码包

应用服务器将生成的编码包传输给目标 NRAI,NRAI 将编码包广播给各 UE。对于每个 UE 来说,冗余数据包 τ_3 被丢弃,不可即时解码数据包 τ_1 被缓存,包含不可即时解码数据包的所有线性独立的数据包均用于解码接收到的线性组合的编码包,当移动 UEs 接收到即时可解码数据包 τ_2 后,更新丢失报告。最终每个节点都会获得丢失的数据包,成功得到完整的数据包。各阶段的丢失数据包索引及端口设备映射表示例如图 5 所示。

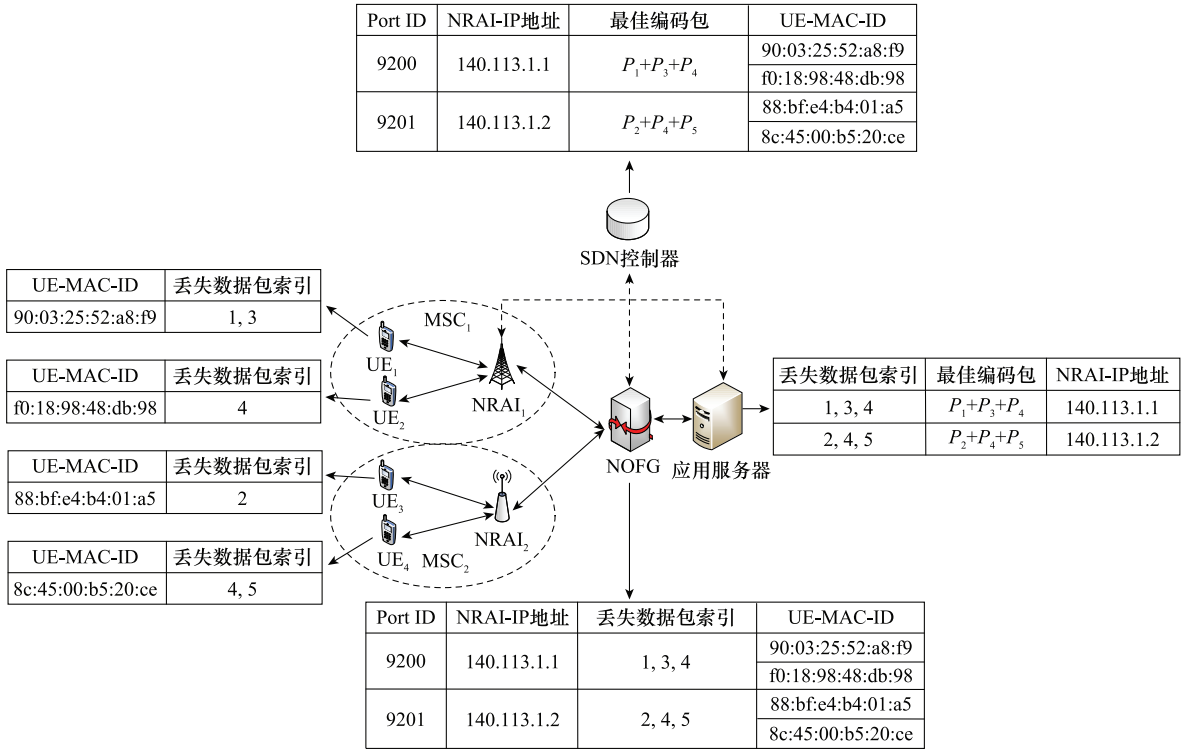


图 5 丢失数据包索引及端口设备映射表示例

Fig. 5 Example of lost data packet index and port device mapping

Fig. 1 基于上述方案设计 TRRS 算法流程,如图 6 所示。

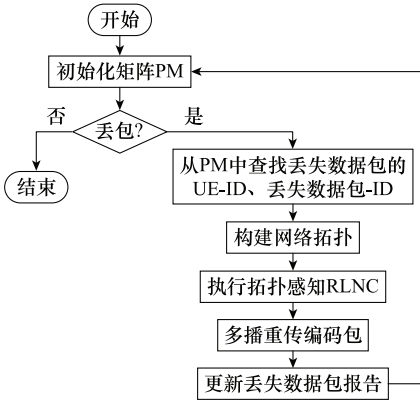


图 6 TRRS 算法流程图

Fig. 6 TRRS algorithm flow chart

在上述方案的基础上设计算法来计算重传次数,以便证明本方案有效地减少了重传次数。由于网络拓扑随着 MSC 中 UEs 的移动而变化,TRRS 的重传性能取决于拓扑,因此代替直接计算数据包平均重传次数,通过迭代来统计数据包的重传次数。

算法 1 TRRS

输入: 用户设备 m , 源文件 P , 端口设备映射表 PT , PM 矩阵, $UE-ID_i = \text{False}$, 重传次数 $R=0$

输出: 重传次数 R

```

1: for all  $m_i \in m$  do
2:   for all  $P_j \in P$  do
3:     if  $P_j \in L$  then
4:        $PM(m_i, P_j) = 0$ 
5:     else
6:        $PM(m_i, P_j) = 1$ 
7:     end if
8:   end for
9: end for
10: While 有丢包 do
11:    $[UE-ID_s, P-ID_s] = \text{find}(PM=0)$ 
12:   for all  $m_i \in UE-ID_s$  AND  $m_i == \text{False}$  do
13:      $T-P-ID_s = 0$ 
14:      $IP = NRAI_i - IP$ 
15:      $T-UE-ID_s = \text{find}(PT=IP)$ 
16:      $T-UE-ID_s = \text{True}$ 
17:      $ID = \text{find}(PM(T-UE-ID_s, :) = 0)$ 
18:      $T-P-ID_s = ID \cup T-P-ID_s$ 
19:      $CB_s = \text{RLNC}(T-P-ID_s)$ 
20:     将  $CB_s$  重传给  $T-UE-ID_s$ 
21:      $R = R + 1$ 
22:     if  $m_i$  接收到  $\tau_2$  then
23:        $PM(m_i, P_j) = 1$ 
24:     end if
25:   end for
26: end while

```


在算法中定义 $\text{find}(\mathbf{PM}=K)$ 返回包含在 \mathbf{PM} 中值为 K 的每个元素组成的向量, $\text{find}(\mathbf{PT}=K)$ 返回包含在 \mathbf{PT} 中值为 K 的每个元素组成的向量, $\mathbf{PM}(H,:)$ 表示 \mathbf{PM} 中第 H 行的所有元素, $\text{RLNC}(T-P-\mathbf{ID}_i)$ 表示对 $T-P-\mathbf{ID}_i$ 集合中的数据包包执行 RLNC 编码方法。相比于传统的随机结合所有的丢失数据包而言,此算法仅结合来自同一 NRAI 丢失的数据包,通过将不同的重传编码包广播给不同 MSC(通过 NRAI 的 IP 地址来识别)中的 UEs,从而减少重传次数。最后,当所有的 UEs 均正确接收到了所有的数据包后,结束重传。

考虑到在实际情况中,虽处于同一 MSC,但不同的 UEs 与 NRAI 之间的距离不同,因此应用服务器也可能会在不同时间接收到来自不同 UEs 的报告,此时,应用服务器将重传过程分为多个子进程,每个进程仅对来自于同一 NRAI 中移动 UEs 的丢失数据包进行编码,而无需接收到所有移动节点的报告,由于 TRRS 可以避免来自不同 MSC 中的 UEs 冗余丢包组合,因此与未结合 MSC 的 SDNC、未将 SDN 的拓扑功能用于 NC 的 NCC 相比,TRRS 可以避免大量冗余编码包的重传。

4 仿真分析

为了评估本文所提出的 TRRS 重传方案,我们使用 OPENT Modeler 14.5 平台进行仿真和实验,并与 NCC 传输和 SDNC^[19] 架构进行比较,以凸显 TRRS 方案在改善网络性能,减少网络流量中的优势。

4.1 仿真设置

在仿真中,考虑基于 SDN 的 MSC,无线接入网为 LTE 和 WiFi,覆盖范围为 200 m^2 ,分别包含 1 个无线接入接口 eNB 和 AP 覆盖范围为 100 m^2 的蜂窝区域^[28],每个蜂窝小区内包含 m 个移动 UEs。蜂窝阶段:由 NRAI 向其蜂窝内的 UEs 传输服务器下发的 G 个数据包^[21];TRRS 阶段:各 UE 向其所属蜂窝的 NRAI 发送丢包报告,进而建立端口设备映射表,生成网络拓扑,应用服务器基于此将拓扑感知 RLNC 的最佳编码包传输给各 UE,即可解码得到原始数据包。仿真在 Windows 7 系统上执行,该系统由配备 8 GB RAM 的 Core i7 3.40 GHz CPU 的计算机上配置。表 1 为仿真参数配置。

表 1 参数配置表		
Table 1 Parameter configuration table		
参数	符号	值
载波带宽/M	B	20
传输可靠性	σ	$1-10^{-3}$
一代大小	G	{10,20,30, 32,40,50,60,70,80,90,100}
有限域大小	q	2^8
数据包长度/bytes	l	1 400
丢包率	ϵ	$\{1,2,4,8,16\}\times 10^{-2}$
仿真时间/m	t_s	500
传输速率/Mbps	v	11.76
移动 UEs 数量	m	{5,10,15,20}

4.2 仿真结果

4.2.1 移动 UEs 的数量对重传次数的影响

当传输 32 个原始数据包时,在 ϵ 为 0.01 的情况下,比较 UEs 的数量对系统中重传次数的影响^[29]。由图 7 可见,随着 UEs 数量的增加,重传次数也增加,这是由于当 UEs 数量增加时,网络中传输的数据包数量也会增加,在 ϵ 一定的情况下,需要重传的编码包的数量也随之增加,但是 TRRS 结合 MSC 卸载蜂窝流量的特点以及其传输最佳编码包,因此具有拓扑信息的 NC 相比于无拓扑信息和未考虑 MSC 特点的 NC 会显示出更高的传输效率。

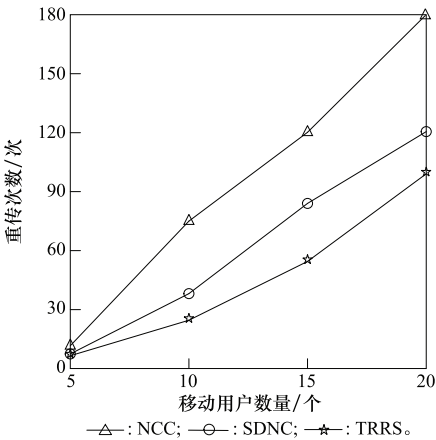


图 7 重传次数与移动 UEs 数量

Fig. 7 Number of retransmissions and the number of mobile UEs

4.2.2 丢包率对重传次数的影响

当每个 MSC 包含 10 个 UEs 和 32 个原始数据包时,比较 ϵ 对重传次数的影响。由图 8 可见,由于 SDN 的拓扑感知功能,TRRS 和 SDNC 方案均优于 NCC。随着丢包率从 0.01 增加到 0.16, NCC 方案所需重传次数呈指数增长,由式(9)可知 SDNC 和 TRRS 方案的重传次数呈线性增长。与 SDNC 相比,TRRS 平均减少了 21.3% 的重传次数,这是由于无线链路通信质量劣于蜂窝链路,NC 的适用性下降,因此基于 SDN 的蜂窝网络弹性更好。

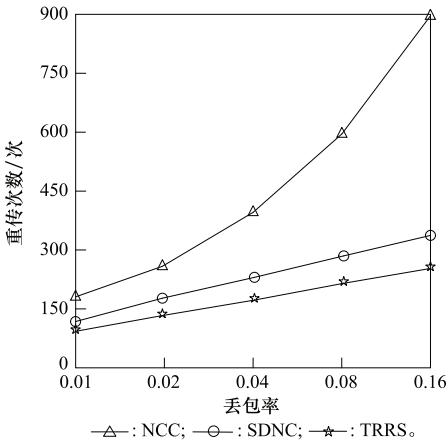


图 8 重传次数与丢包率

Fig. 8 Number of retransmissions and packet loss rate

4.2.3 消耗能量

当 ϵ 为 0.01 时, 传输 32 个原始数据包, 比较 TRRS、NCC、SDNC 3 种方案的平均能耗。由图 9 可见, 随着移动 UEs 数量的增加, 3 种传输方案的平均能耗呈稳定增长趋势, 但是由于 MSC 可以从宏蜂窝中卸载数据流量, 很大程度上节约了能耗^[30], 因此 TRRS 和 NCC 的平均能耗低于 SDNC。由于 TRRS 传输最佳编码包, 减少了传输次数, 因此相比于 NCC, TRRS 的平均能耗减少了 12.4%。

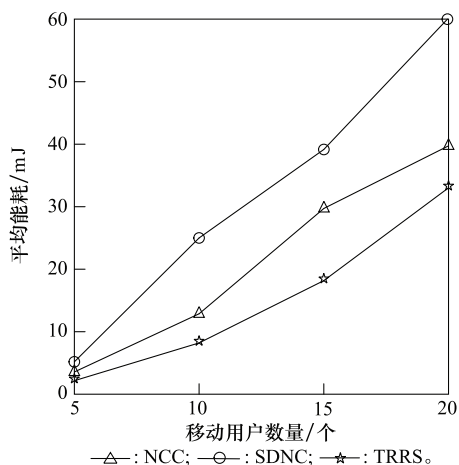


图 9 平均能耗与移动 UEs 数量

Fig. 9 Average energy consumption and number of mobile UEs

5 结 论

本文提出了一种在 MSC 中基于 SDN 的具有拓扑感知功能的 RLNC 最佳编码包重传方案 TRRS。所提出的 TRRS 将由 SDN 控制器获得的网络拓扑信息嵌入 RLNC 中, 智能地组合丢失数据包, 并将其传输给对应的 NRAI。实验结果表明, 该方案有效地减少了重传次数, 增加了网络弹性, 降低了蜂窝链路的能耗, 节省了网络资源。

参考文献

- [1] SHAW V K, ROY S D. Handoff analysis in 5G small cell network[C]//Proc. of the IEEE International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems, 2020: 655–659.
- [2] MARCUS D R, GEORGIOS M, AYMAN R, et al. Key management for beyond 5G mobile small cells: a survey[J]. IEEE Access, 2019, 7: 59200–59236.
- [3] ADAT V, POLITIS I, TSELIOS C, et al. Secure network coding for SDN-based mobile small cells[C]//Proc. of the 9th International EAI Conference on Broadband Communications, Networks, and Systems, 2019: 347–356.
- [4] 李云, 王俊伟, 赵为粮, 等. 基于基站密度和业务负载的异构蜂窝网络能效优化[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(4): 854–859.
- LI Y, WANG J W, ZHAO W L, et al. Optimizing the energy efficiency of heterogeneous cellular networks based on the base station density and traffic load[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(4): 854–859.

- [5] IRUM S, TORRE R, SALAH H, et al. Network-coded cooperative communication in virtualized mobile small cells[C]//Proc. of the IEEE 2nd 5G World Forum, 2019: 264–268.
- [6] IMT-2020(5G)推进组. 5G 承载网架构和技术方案[EB/OL]. [2021–01–19]. www.docin.com/p-2456979863.html.
- IMT-2020(5G) Propulsion Team. 5G bearer network architecture and technical solutions[EB/OL]. [2021–01–19]. www.docin.com/p-2456979863.html.
- [7] TSAI A. Throughput comparison for orthogonal and non-orthogonal mobile small-cell networks[C]//Proc. of the IEEE 90th Vehicular Technology Conference, 2019.
- [8] PARK D G, OH J W, JEONG J. SFSH: a novel smart factory SDN-layer handoff scheme in 5G-enabled mobile networks[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2020, 11(12): 5913–5925.
- [9] AHLWEDE R, CAI N, LI S Y R, et al. Network information flow[J]. IEEE Trans. on Information Theory, 2000, 46(4): 1204–1216.
- [10] RISCHKE J, GABRIEL F, PANDI S, et al. Improving communication reliability efficiently: adaptive redundancy for RLNC in SDN[C]//Proc. of the IEEE Conference on Network Soft Warization, 2019: 291–295.
- [11] BRAHIMI M A, MERAZKA F. On reducing the encoding complexity of random linear network coding[C]//Proc. of the IEEE International Conference on Electrical Engineering, 2020.
- [12] AI J, CHEN H C, GUO Z P, et al. Improving resiliency of software-defined networks with network coding-based multipath routing[C]//Proc. of the IEEE Symposium on Computers and Communications, 2019.
- [13] 刘思诚. 基于软件定义网络的网络编码框架[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- LIU S C. Networking coding framework based on software defined network[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [14] ALSAEEDI M, MOHAMAD M M, AL-ROUBAIEY A A. Toward adaptive and scalable openflow-SDN flow control: a survey[J]. IEEE Access, 2019, 7: 107346–107379.
- [15] FELICIAN N, ADAM S, BALAZS S, et al. Towards smart-flow: case studies on enhanced programmable forwarding in openflow switches[C]//Proc. of the Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication, 2012: 85–86.
- [16] LIU S C, HUA B. NCos: a framework for realizing network coding over software-defined network[C]//Proc. of the IEEE 39th Annual Conference on Local Computer Networks, 2014: 474–477.
- [17] HANSEN J, LUCANI D E, KRIGSLUND J, et al. Network coded software defined networking: enabling 5G transmission and storage networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 100–107.
- [18] YANG J, DAI B, LV L J, et al. Coding openflow: enable network coding in SDN networks[J]. International Journal of Computer Networks & Communications, 2015, 7(5): 29–38.

- [19] DI J, DONG J T. A network coding architecture base on open-flow network[C]//Proc. of the 4th International Conference on Mechanical Materials and Manufacturing Engineering, 2016: 216–220.
- [20] 刘道桂. 基于 SDN/NFV 的网控编码技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- LIU D G. Research on network control coding technology based on SDN/NFV[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [21] LEYVA-MAYORGA I, TORRE R, PLA V, et al. Network-coded cooperation and multi-connectivity for massive content delivery[J]. IEEE Access, 2020, 8: 15656–15672.
- [22] FLAUZAC O, ROBLEDO E G, GONZALEZ C, et al. SDN architecture to prevent attacks with openflow[C]//Proc. of the IEEE 8th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications, 2020.
- [23] HU H S, WANG H, ZHU Q N, et al. Uplink performance analysis in multi-tier heterogeneous cellular networks with power control and biased user association[J]. China Communications, 2016, 13(12): 25–36.
- [24] XU F M, YAO H P, ZHAO C L, et al. Towards next generation software-defined radio access network-architecture, deployment, and use case[J]. Wireless Communications and Networking, 2016, 264: 1–12.
- [25] IRUM S, TORRE R, SALAH H, et al. Network-coded cooperative communication in virtualized mobile small cells[C]//Proc. of the IEEE 2nd 5G World Forum, 2019: 264–268.
- [26] PHANGPHAN C, A-MAPAT N, MOUNGNOUL P. Network design for LTE-Pro[C]//Proc. of the IEEE 6th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology, 2020.
- [27] KSENTINI A, BAGAA M, TALEB T. On using SDN in 5G: the controller placement problem[C]//Proc. of the IEEE Global Communications Conference, 2016.
- [28] ALI M, QAISAR S, NAEEM M, et al. LTE-U WiFi hetnets: enabling spectrum sharing for 5G/beyond 5G systems[J]. IEEE Internet of Things Magazine, 2020, 3(4): 60–65.
- [29] TSIMBALO E, TASSI A, PIECHOCKI R J. Reliability of multicast under random linear network coding[J]. IEEE Trans. on Communications, 2018, 66(6): 2547–2559.
- [30] CHANG Z, ZHOU S, RISTANIEMI T, et al. Collaborative mobile clouds: an energy efficient paradigm for content sharing[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(2): 186–192.

作者简介

姚玉坤(1964—),女,教授,硕士,主要研究方向为宽带自组织无线网络、网络编码。

任丽丹(1996—),女,硕士研究生,主要研究方向为无线网络编码。

任智(1971—),男,教授,博士,主要研究方向为宽带无线移动通信网络。

冯鑫(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为无线网络编码。

杜文正(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为数字图像加密。