

基于自适应随机线性网络编码的优先级调度方案

王练* 张贺 张昭 张勋杨

(重庆邮电大学计算机科学与技术学院 重庆 400065)

摘要: 该文针对无线多播网络中基于随机线性网络编码(RLNC)调度方案计算复杂度高, 且网络传输性能易受反馈信息影响等问题, 提出一种基于自适应RLNC的优先级调度方案(PSARLNC)。该方案结合视频流的特征采用适应多播的RLNC, 相较于传统RLNC计算复杂度降低。经过初始传输后, 在后续数据恢复阶段, 综合考虑数据包剩余传输时隙, 选取目的节点增益最大传输方式, 最大化数据传输。同时, 各中继节点根据接收情况, 构建各自解码概率值, 并以此为依据确定调度优先级并完成转发, 自适应调整各节点传输, 有效减少对反馈信息的依赖。仿真结果表明该方案与完全反馈方案性能十分接近, 且在减小计算复杂度和降低对反馈信息依赖同时保证了较好的性能。

关键词: 无线多播网络; 随机线性网络编码; 多中继; 调度; 反馈

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)08-1861-08

DOI: [10.11999/JEIT180885](https://doi.org/10.11999/JEIT180885)

A Priority Scheduling Scheme Based on Adaptive Random Linear Network Coding

WANG Lian ZHANG He ZHANG Zhao ZHANG Xunyang

(School of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: A Priority Scheduling scheme based on Adaptive Random Linear Network Coding (PSARLNC) is proposed, to avoid the high computation complexity of the scheduling scheme based on Random Linear Network Coding (RLNC) and the high feedback dependence of the network performance. The characteristics of the video stream and RLNC adapted to multicast are combined in this scheme. Compared with the traditional RLNC, the computation complexity of this scheme is reduced. After the initial transmission, the transmission slots left of the data packet are comprehensively considered in the subsequent data recovery phase, and the maximum transmission node of the destination node gain is selected to maximize data transmission. At the same time, the decoding probability is available according to the different receiving situations in each relay node. According to the decoding probability value, the scheduling priority is determined, and the forwarding is completed. The transmission of each node is adaptively adjusted, and the feedback information is effectively reduced. The simulation results show that the performance of this scheme is approached to the full-feedback scheme, with better performance in the reducing computational complexity and the decreasing feedback dependence.

Key words: Wireless multicast network; Random Linear Network Coding(RLNC); Multi-relay; Scheduling; Feedback

收稿日期: 2018-09-18; 改回日期: 2019-02-20; 网络出版: 2019-03-04

*通信作者: 王练 wanglian@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61876200, 61602073), 国家重点研发计划(2018YFB0904900, 2018YFB0904905)

Foundation Items: National Natural Science Foundation of China (61876200, 61602073), National Key R&D Program of China (2018YFB0904900, 2018YFB0904905)

1 引言

网络编码(Network Coding, NC)思想最初由 Ahlswede等人^[1]提出, 允许中间节点对接收到的信息进行编码后再转发, 相关研究证明其传输容量可逼近多播容量理论上限。文献^[2]将网络编码应用于多播网络, 证明存在能够提供更高鲁棒性的编码策略以及利用网络编码可实现多跳最优多播通信。文献^[3]提出线性网络编码, 将多数数据流通过线性编码

方式进行组合,目的节点通过解码获得所需数据。文献[4]提出机会式网络编码(Opportunistic Network Coding, ONC),根据相应编码算法选择数据包参与生成编码包再进行转发。ONC中能够参与编码的数据包数量受编码条件限制,且生成的编码包对接收节点不一定全为有效再生编码包,导致重传有效性低,网络吞吐量降低。文献[5]提出随机线性网络编码(Random Linear Network Coding, RLNC),使得网络中信宿节点能以较高的概率成功译码,进一步提高网络吞吐量。文献[6]将随机线性网络编码应用于有损多播网络以实现更好的传输可靠性,通过计算消息到达目的节点的概率来表征网络性能,并且关注更加实际的网络传输环境,给出消息成功传输概率的下限。文献[7]提出了一种多源多中继网络中的随机线性网络编码,通过应用重叠数据代的思想提出基于计算转发的RLNC/CF(Compute-and-Forward)传输方案,通过补偿前一代信道状态信息给出参数概率函数表达式,为选择传输方案提供依据,从而提升网络吞吐量。

对随机线性网络编码当有限域足够大接收节点总能译码出请求包^[8],但相关研究证明RLNC解码复杂度为 $O(N^3)$,其中 N 为参与编码的原始包数,随着 N 的增大其解码复杂度随之增大,对于接收节点较多的应用其计算复杂度相当高。为降低RLNC计算复杂度,文献[9]将数据分成 k 组,以减少传输数据量。文献[10]中提出了使用重叠数据代的优化方案,并且结合稀疏编码技术来降低复杂性。由于随机线性网络编码具有一次可编码多数据包的特点,当接收端接收到足够的线性无关编码包后可解码出请求包,其在传输吞吐量方面有优势。在视频流等多播应用场景,由于用户可能会使用具有不同处理功能和带宽的多样化设备,所需视频质量要求有差异。因而发送源需提供差异化多播视频数据包,且多播传输需满足高吞吐量与低延迟要求。为实现差异化服务要求,将视频流数据包分层编码,低层至高层重要性依次降低,低层数据包提供基础视频质量保障,高层数据包依次增强视频质量。只有低层数据包已被正确接收,高层数据包才可起到增强视频质量的作用^[11]。文献[12]研究多播视频服务业务,将视频数据分为 k 层传输,并且每层都运用稀疏随机线性网络编码以降低RLNC解码器的计算复杂度。文献[13]就无线网络多播提出自适应随机网络编码多播调度策略,对多播数据包采用基于分代数据包连续递增分组的方式最大化组播会话吞吐量,并在一定程度上降低了传统随机线性网络编码的解码复杂度。文献[14]将此方案扩展至中继协

作多播网络,充分考虑了多媒体数据的特性,通过基站与中继竞争调度最大限度地提高网络吞吐量。由于重传数据包的选择和传输有效性对分组传送确认(反馈)信息存在明显依赖,特别针对网络节点数量多,反馈信息开销大的网络不适用。文献[15]考虑了传输时间限制和分组相互依赖的无线网络编码,提出跨层传输方案,利用物理层波束结合自适应网络编码实现网络增益,并且提出基于样本的反馈方案,从整体上减少系统开销。文献[16]为在有限反馈限制下实现有损广播信道的高效传输,将分代的数据包分为两阶段编码,划分子代并且将相同子代数据包线性组合,通过求解最佳子代划分问题提出一种启发式算法。文献[17]研究了无反馈随机线性网络编码在异构单跳无线网络中广播分层视频流的应用,将RLNC与不等错误保护相结合,利用节点解码数据帧期望百分比这一性能度量,通过比较基于随机线性网络编码的无反馈方案(feedback-free scheme based on Random Linear Network Coding, Free-RLNC)与基于随机线性网络编码的全反馈方案(Full-feedback scheme based on Random Linear Network Coding, Full-RLNC),并提出计算期望百分比的通用计算模型。

以上方案注重单一问题的解决,特别是对于随机线性网络编码计算复杂度及反馈依赖不能兼顾考虑,本文针对特定多播网络随机线性网络编码计算复杂度及反馈受限问题,提出一种基于自适应随机线性网络编码的优先级调度方案(Priority Scheduling scheme based on Adaptive Random Linear Network Coding, PSARLNC),通过自适应随机线性网络编码减少传统随机线性网络编码的计算复杂度,并且结合网络数据包传输时间限制的特点,为确保数据包在时限到达之前传输至目的节点,提出相应多播数据包调度算法,并且通过解码数据包概率计算中继优先级进行中继选择,以保证有限反馈之下的高效数据多播传输的效率。

2 系统模型

本文系统模型为单信源多中继无线网络,文中首先考虑单信宿情况,模型可扩展到多信宿情况。如图1所示,信源为 S ,信宿为 D ,中继节点为 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_N\}$,其中 N 为中继节点个数。假设系统模型中信宿 D 不在信源的传输覆盖范围之内,需借助中继节点实现协作通信。相对于信源 S 而言, N 个中继节点之间公平对等,且无法直接通信,均采用半双工工作模式。信源 S 到中继节点 R_i 的链路丢包率表示为 P_{SR_i} ($i \in \{1, 2, \dots, N\}$),各

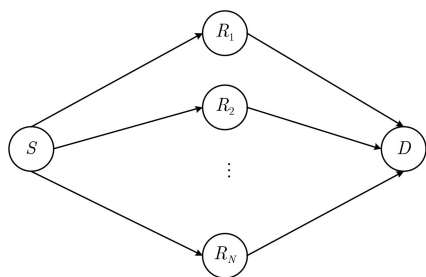


图 1 系统模型图

中继节点到信宿 D 的链路丢包率表示为 $P_{R_i,D}$ ($i \in \{1, 2, \dots, N\}$), 链路丢包相互独立。此外, 假设同一链路上的初始传输与重传具有相同的丢包率, 单位时隙只发送一个数据包, 且整个传输过程只需有限反馈信息。

为适应多播数据包特点, 假定信源 S 需传输 L 个数据包 $p = \{p_1, p_2, \dots, p_L\}$, 信源产生的由数据包 p 线性编码生成的相对独立的编码包为一代数据分组, 用式(1) G_n 表示源 S 生成的每一代数据分组^[10]。

$$G_n = \alpha_{ij} p_j \quad (1)$$

其中, $\alpha_{ij} (i \in \{1, 2, \dots, L\}, j \in \{1, 2, \dots, i\})$ 为从足够大的有限域 $GF(q)$ 中选取的编码系数。

具体而言, 假设源节点传输 L 个数据包, 其生成的每代数据包可表示为

$$G_n = \begin{cases} \alpha_{11} p_1, & n = 1 \\ \alpha_{21} p_1 + \alpha_{22} p_2, & n = 2 \\ \alpha_{31} p_1 + \alpha_{32} p_2 + \alpha_{33} p_3, & n = 3 \\ \vdots & \vdots \\ \alpha_{L1} p_1 + \alpha_{L2} p_2 + \alpha_{L3} p_3 + \dots + \alpha_{LL} p_L, & n = L \end{cases} \quad (2)$$

以上基于分代的编码包每一代编码包中都包含上一代信息, 数据在传输过程中都包含相应低层数据包, 使得低层重要数据包到达信宿节点概率增大, 更好地实现低层数据的基本功能, 此编码方式通过改变传统随机线性网络编码方式, 以充分适应多媒体数据优先级特点, 对于视频流等应用可满足不同终端服务质量要求, 且该编码方式的解码复杂度低于传统随机线性网络编码, 具体见后续复杂度分析, 表1为文中主要符号及其含义。

2.1 多播传输调度

本文考虑将时间步长设置为发送每一代数据分组的持续时间。将系统所允许传输时限(即数据包生命周期)定义 $T = L + x$, 其中 L 为初始传输所有 L 代所需要的时间, x 为后续数据包传输允许的最大时隙开销, 即在截止期限之前附加的编码分组传输时间, 即总传输时隙不能超过 T , 否则会因网络

表 1 主要符号含义

符号	含义
S	源节点
R_i	第 i 个中继节点
P_{S,R_i}	S 到 R_i 链路丢包率
$P_{R_i,D}$	R_i 到 D 链路丢包率
C_{R_f}	中继对传输信息的覆盖
G_n	信源生成的第 n 代数据包
T	系统所允许传输时限
R^*	根据中继选择算法所选中继集合

资源限制导致数据包丢弃。进一步, 定义 $n = L + w$ 为恢复所有 L 代所需的传输时间, 其中 L 的定义与上相同, w 为保证信宿节点接收到所需数据包所需的时间开销。

定义1 中断概率 Pr_{out} : 信宿在设定的 T 时间步长内不能恢复全部数据包的概率。即若 $w > x$, 则系统所允许时隙 T 小于恢复数据包所需的传输时隙 n , 有 $T < n$, 则信宿不能恢复所有数据包而发生数据中断, 中断概率如式(3)

$$Pr_{out} = Pr(w > x) \quad (3)$$

用图2结构表示中继节点记录接收到数据包的状态:

	G_1	G_2	G_3	G_4	...	G_n
R_i	1	0	1	0	...	1

图 2 R_i 的状态记录表

图2为中继节点接收对应分代数据的情况, 对应项为“1”表示相应代数据分组接收到, 对应项为“0”表示相应代数据分组丢失。

定义2 中继对原始信息的覆盖 C_{R_f} : 所有中继节点接收状态矩阵相对应的元素进行逻辑或运算的结果。

$$C_{R_f} = C_{R_1} \vee C_{R_2} \vee \dots \vee C_{R_N} \quad (4)$$

由于信源和信宿不能直接通信, 在传输时间限制情况下为尽量避免中断出现, 传输时隙在源节点和中继节点处的分配过程为: 第1阶段源节点传输 L 组数据分组给中继节点, 由于无线信道的易失性, 理论上中继节点处接收存在差异。由于各代数据包之间存在迭代关系, 且只有低层数据包接收到才可以解码高层数据包, 所以在系统所允许传输时间内需尽可能接收更多层低层数据包以获得更高的数据质量。因此需比较中继覆盖 C_{R_f} 中所接收到的由最低层开始连续的最大代号 n (其对应的数据分组

为 G_n)与系统允许的剩余开销 x 之间的关系, 只有从最低层开始连续接收到的编码包才可参与解码数据。如果 $n \geq x$, 此时只能选择中继节点转发数据包, 若信源继续发送占用传输时间则将导致中继不能把所接收到全部有效信息传送至信宿, 例如 $n=3$ 表示中继覆盖收到从低层开始连续的3个分组, 当 $x=2$ 时系统只有2个单位传输时隙, 此时应由中继占用传输时间发送信息至信宿, 如果 $n < x$, 此时可以先由源节点发送数据包至中继节点, 当达到 $n = x$ 时, 再由中继节点进行转发, 整个传输过程伪代码如表2所示, 中继节点处选择策略在下节讨论。

2.2 中继节点选择调度

信源传输数据包至中继节点, 后续由中继完成调度传输, 由于中继节点接收信源数据包存在差异, 且为避免不同中继同时传输数据包带来的冲突, 需根据中继具体接收状态选择最优中继进行传输。

表 2 传输调度伪代码

```

输入:  $x, C_{R_1}, C_{R_2}, \dots, C_{R_N}$ 
输出:  $C_D$ 
//调度过程
 $C_{R_j} = C_{R_1} \vee C_{R_2} \vee \dots \vee C_{R_N}$ ; //获得R对信息的覆盖  $C_{R_j}$ 
 $n \leftarrow 0$ ;
 $U = \emptyset$ ;
for ( $m = 1, 2, \dots, \text{length}(C_{R_j})$ )//
    if  $C_{R_j}(m) == 0$  //如果对应包丢失
         $U = U \cup m$  //将m加入到集合U中
        由U得出连续最大代号n
    end if
end for
if  $n \geq x$ 
    while  $x > 0$ 
        运行中继节点调度算法;
         $x \leftarrow x - 1$ ;
    end while
end if
while  $n < x$ 
    源节点发送数据包;
     $x \leftarrow x - 1$ ;
    if  $n = x$ 
        break;
    end if
end while
while  $x > 0$ 
    运行中继节点调度算法;
end while
    
```

定义3 L个编码数据包经无线信道传输后, 若其中m个编码数据包被中继节点接收到, 则此中继节点数据包接收概率定义为 $\text{Pr}(m|L)$, 具体如式(5)所示, 其中 p_e 为对应链路丢包率。

$$\text{Pr}(m|L) = \prod_{l=1}^L \binom{L}{m} (1 - p_e)^m p_e^{L-m} \quad (5)$$

数据包接收概率体现了中继对信源数据包的接收情况, 由于编码方式的特点, 在相同接收概率条件下仍需进一步判断更优中继节点。假设传输L数据包后 R_1 和 R_2 均接收到3个数据包, 其接收情况如图3所示。

G_1	G_2	G_3	G_4	...	G_n
1	1	1	0	...	0

(a) R_1 接受情况

G_1	G_2	G_3	G_4	...	G_n
0	1	1	1	...	0

(b) R_2 接受情况

图 3 接收概率相同的两个中继情况

依据 R_1 的接收情况, 根据编码方式可知 R_1 可解码出数据包 p_1, p_2 和 p_3 , 而依据 R_2 的接收情况, 当前不能解码出所需数据包。为达到筛选中继的目的, 定义函数 $I(l)$ 。

定义4 条件函数 $I(l)$: 当 l 代被接收时, 定义其值为对应的代号 l , 其他情况则为0。具体表示如式(6)

$$I(l) = \begin{cases} l, & \text{当} l \text{代被接收} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (6)$$

定义5 权值函数 $D(l)$: 定义为对应接收代总和的倒数, 用以表示中继节点权重值大小。具体表示如式(7)

$$D(l) = 1 / \sum_{i=1}^L I(i) \quad (7)$$

定义6 解码概率函数 Pr : 表示节点对所传输数据包的解码概率, 其值为权重值和数据包接收概率的乘积。具体表示如式(8)

$$\text{Pr} = D(l) \text{Pr}(m|L) \quad (8)$$

将式(5)和式(7)代入式(8)可得

$$\text{Pr} = \frac{1}{\sum_{i=1}^L I(i)} \prod_{l=1}^L \binom{L}{m} (1 - p_e)^m p_e^{L-m} \quad (9)$$

由于反馈信息的限制, 进一步根据解码概率作为中继节点选择的依据。当源节点多播数据包至中继节点, 由于无线信道的易失性, 各中继节点接收

状态各不相同，通过计算各中继的解码概率选择丢包恢复概率最优的中继 \mathbf{R}^* ，具体表示如式(10)

$$\mathbf{R}^* = \arg \max_{\mathbf{R}^* \in \mathbf{R}} \left\{ \frac{1}{\sum_{l=1}^L I(l)} \left(\prod_{l=1}^L \binom{L}{m} (1-p_e)^m p_e^{L-m} \right) p_q \right\} \quad (10)$$

其中， p_q 为下一阶段链路丢包率，该方案中具体为中继到传输节点的丢包率，若 \mathbf{R}^* 包含两个或两个以上中继，则随机选取1个进行传输，中继节点调度具体伪代码如表3所示。

表 3 中继节点调度主要伪代码

```

输入:  $x, \mathbf{C}_{R_1}, \mathbf{C}_{R_2}, \dots, \mathbf{C}_{R_N}$ 
输出:  $\mathbf{R}^*$ 
//中继调度
 $k \leftarrow 0$ ;
 $P \leftarrow 0$ ;
 $I \leftarrow 0$ ;
while  $x > 0$ 
  for ( $m = 1, 2, \dots, \text{length}(\mathbf{R}^t)$ ) //初始  $\mathbf{R}^t = \{R_1, R_2, \dots, R_N\}$ 
    for  $n = 1 : L$ 
      if ( $m, n \neq 0$ )
         $k \leftarrow k + 1$ ;
         $P \leftarrow P + n$ ;
         $I \leftarrow 1/P$ ; //获得中继权值
      end if
    end for
  end for
   $\mathbf{R}^* \leftarrow \arg \max \left\{ I \cdot \prod_{l=1}^L \mathbf{C}_L^k (1 - P_{SR_l})^k P_{SR_l}^{L-k} \cdot P_{R,D} \right\}$  //获得
  转发中继节点中继转发数据包;
   $x \leftarrow x - 1$ ;
   $\mathbf{R}^t \leftarrow \mathbf{R}^t - \mathbf{R}^*$ ; //去除已转发的中继节点
end while

```

3 性能分析

3.1 计算复杂度分析

该方案采用基于分代的自适应网络编码的思想不同于传统随机线性网络编码，整体计算复杂度比传统随机线性网络编码低。其中基于分代的自适应随机线性网络编码属于稀疏网络编码。对于信宿节点，在 t 时刻，接收到的编码向量用 $\mathbf{a}_j(t)$ 表示，经过 T 轮传输后，其接收到的网络编码矩阵用 \mathbf{A}_j 表示。对于编码向量 $\mathbf{a}_j(t)$ 而言，其编码密度用 $d = \delta/n$ 表示，其中 δ 为编码向量中非0系数的个数， n 为编码

向量系数总数。信宿已经具有 r 个线性独立分组时接收新的线性独立分组的概率如式(11)所示

$$1 - (1-d)^{n-r} \leq p_r(n, d) \leq 1 \quad (11)$$

假设信宿已经具有 $i (i < n)$ 个相对线性独立的分组，则其接收具有密度为 $\rho(i, n)$ 的多个稀疏编码分组之后预计开销为 $g(i, n)$ ，称为密度调节函数^[18]，如式(12)所示

$$g(i, n) = \frac{1}{p(i, n)} - 1 \quad (12)$$

且 $g(i, n)$ 与 $\rho(i, n)$ 的关系如式(13)

$$g(i, n) \leq \frac{(1 - \rho(i, n))^{n-i}}{1 - (1 - \rho(i, n))^{n-i}} \quad (13)$$

将密度 $d = \delta/n$ 代入式(13)可得

$$g(i, n) \leq \frac{(1-d)^{n-i}}{1 - (1-d)^{n-i}} \quad (14)$$

本文方案每一代数据包都具有不同的稀疏度，可以通过选择不同稀疏度调节函数来实现，总的开销可以表示为 $\sum_{i=0}^{n-1} g(i, n)$ ，对于稀疏网络编码来说，当数据包数足够大的情况下，其就有渐进零性能损失，即 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^{n-1} g(i, n) / n = 0$ ，对于随机线性网络编码，其密度调节函数为 $g(i, n) = q^{i-n}$ ，文献[19]证明，对于绝大多数接收情况来说，稀疏网络编码的编码密度相较于传统随机线性网络编码低1个数量级，可以达到 $O(N^2)$

信宿接收到的信息可以表示为 $\mathbf{A}_j \mathbf{X} = \mathbf{B}$ ， \mathbf{A}_j 为接收编码矩阵，高斯消元法求解方程组过程中，计算复杂度主要由其中复杂的乘法运算，整体计算表达式为 $\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \alpha_j^i(t) \cdot x_i$ ，传统随机线性网络编码矩阵为 $n \times n$ 完全矩阵，可得其求解复杂度为 $O(n \times n^2) = O(n^3)$ ，而稀疏网络编码计算可以表示为 $\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{n_i} \alpha_j^i(t) \cdot x_i (n_i \in (0, n))$ ，且两者关系如式(15)所示

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \alpha_j^i(t) \cdot x_i \leq \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{n_i} \alpha_j^i(t) \cdot x_i, n_i \in (0, n) \quad (15)$$

自适应随机线性网络编码复杂度为 $O(n + n(n-1)/2) = O(n^2)$ ，即解码复杂度降低1个等级，对于接收节点数量较多的情况，计算开销降低更加显著。

3.2 吞吐量分析

本方案相较于传统随机线性网络编码而言，其传输吞吐量存在明显升高，方案中传输吞吐量用每

个时隙解码数据包的个数 η 来表征, η 的具体表达式表示如式(16)

$$\eta = \kappa / T \quad (16)$$

其中, T 为传输时隙, κ 为所接收解码数据包的数量。由于链路状态的不同,中继处在相同时间接收数据包数也存在差异,最大接收数量为数据包总数 n ,若选择最大丢包率线路进行传输,则接收数据包数量最小期望值如式(17)

$$\kappa \geq \sum_{j=1}^N \frac{1}{1 - \max_{e_j \in \{1,2,\dots,N\}} \{P_{e_j}\}} \quad (17)$$

可得 η 的期望取值范围为

$$\frac{\sum_{j=1}^N \frac{1}{1 - \max_{e_j \in \{1,2,\dots,N\}} \{P_{e_j}\}}}{T} \leq \eta \leq \frac{\sum_{j=1}^N n}{T} \quad (18)$$

系统反馈期望吞吐比 $\beta = c / (T + t_{\text{back}})$ 表示系统在反馈信息约束下解码数据包层数的比率,以此反应反馈信息带来的影响,其中 t_{back} 为相应的反馈开销。

4 仿真结果

本文将PSARLNC方案与Full-RLNC方案和Free-RLNC方案进行对比。仿真在单信源多中继网络环境下进行,将系统反馈期望吞吐比和平均解码层数作为性能指标,研究传输次数、中继节点和数据包数对传输性能的影响,为避免数据的偶然性,最终结果为多次仿真结果取平均值。

图4所示为平均解码层数随系统允许传输时隙改变的情况,图5所示为反馈开销比随传输时隙的变化。其中参数设置情况为 $P_{SR_i} = 0.3$, $P_{R_iD} = [0.65, 0.40, 0.20, 0.35, 0.50]$, $L = 10$ 。仿真结果表明本文所提方案的反馈开销吞吐比均优于其他两个方案,表明在有限的反馈条件下其解码层数比率均优于其他两种方案。随着传输时隙的增加,3种方案平均解码层数都逐渐升高。其中PSARLNC方案效果与全反馈效果十分接近,随着系统允许传输单位时隙增加到22之后两个方案逼近重合,并优于Free-RLNC方案,且差距逐渐增大。原因为当传输时隙 T 增加时,源节点传输完所要传输的数据包时,数据包剩余时隙增多,其相对于信源重传中继节点时隙增多,最后导致平均解码层数增加。

图6所示为平均解码层数随中继节点数改变的趋势,图7所示为反馈开销比随中继节点的变化,其中参数设置为 $L=10$, $T=18$,其他条件不变。所提方案反馈开销比同样优于其他两种方案。随着中

继节点的增多,3种方案平均解码层数都逐渐增加,PSARLNC方案与Full-RLNC依旧十分接近,并且随着中继节点数的增多,与Free-RLNC方案差距也有所增加,这是由于中继节点的增加,使得中继接收情况多样性增加,总体使得中继达到全覆盖

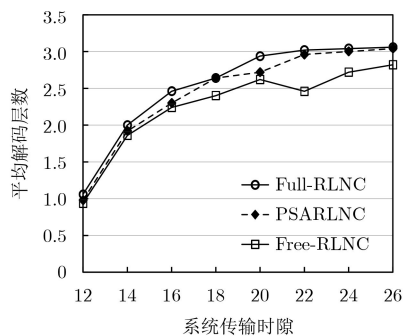


图4 平均解码层数随传输时隙的变化

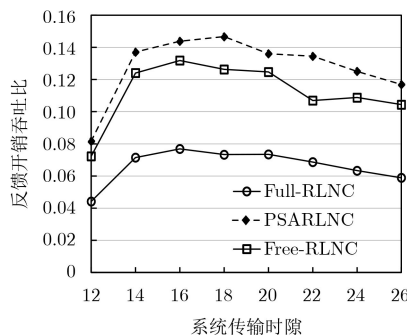


图5 反馈开销比随传输时隙的变化

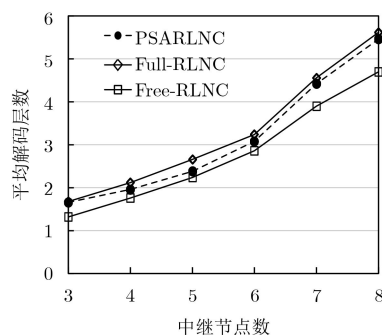


图6 平均解码层数随中继节点的变化

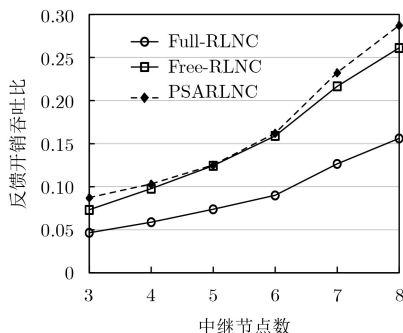


图7 反馈开销比随中继节点的变化

的可能性增大,适当增加中继有助于提升系统传输性能。

图8所示反映数据包数对平均解码层数的影响, $N=7$, $T=18$, 数据包数从6增加至18, 其他条件不变。图9所示为反馈开销比随数据包数的变化, 整体上所提方案平均解码层数比率依然优于其他两种方案。当数据包从6增加至10过程中, 3种方案平均解码层数逐渐增加, 且增加过程中PSARLNC方案仍与Full-RLNC方案接近, 数据包数为12时PSARLNC方案甚至超过Full-RLNC方案, 原因为随着信源发送数据包数的增多, 信宿成功解码所有层数据的层基数增大, 最终导致其平均解码层数变大。但数据包数超过12时, 平均解码层数下降明显。原因为随着数据包数增多, 成功解码数据层数的总数增加, 这将导致平均解码层数逐渐增加, 但由于传输时隙的限制, 逐渐增大的数据包数将导致中继传输时隙的减少, 当数据包数从12增加至18时, 平均解码层数急剧下降。仿真结果说明一定范围内适当增加数据包数可以提升系统性能。

5 结论

本文针对中继协作无线多播网络提出了基于自适应随机线性网络编码的优先级传输调度方案PSARLNC。针对传统随机线性网络编码计算复杂度高的问题, 方案通过采用基于分代的随机线性网络编码以适应多媒体多播传输特点, 整体上降低传

统随机线性网络编码计算复杂度1个数量级, 达到 $O(N^2)$ 。为尽量减少反馈信息带来的约束与限制, 中继节点通过综合考虑解码概率与信道状态进行传输调度, 改善单步及时反馈带来的反馈开销较大问题。分析与仿真结果表明PSARLNC方案在有限的反馈开销条件下, 平均解码层数能够达到完全反馈几乎相同的性能, 保证了较小的开销情况下达到较好的传输效果, 尤其是在复杂网络中, 计算开销优势更加突出, 该方案可推广应用到多接收节点的多播通信网络。

参考文献

- [1] AHLWEDE R, CAI Ning, LI S Y R, *et al.* Network information flow[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(4): 1204–1216. doi: 10.1109/18.850663.
- [2] KOETTER R and MEDARD M. An algebraic approach to network coding[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2003, 11(5): 782–795. doi: 10.1109/TNET.2003.818197.
- [3] LI S Y R, YEUNG R W, and CAI Ning. Linear network coding[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(2): 371–381. doi: 10.1109/tit.2002.807285.
- [4] 苟亮, 张更新, 孙伟, 等. 无线网络中基于机会网络编码的加权广播重传[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(3): 749–753. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00598.
GOU Liang, ZHANG Gengxin, SUN Wei, *et al.* Weighted broadcasting retransmission based on opportunistic network coding in wireless networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(3): 749–753. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00598.
- [5] HO T, KOETTER R, MEDARD M, *et al.* The benefits of coding over routing in a randomized setting[C]. *IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings*, Yokohama, Japan, 2003: 442. doi: 10.1109/ISIT.2003.1228459.
- [6] TSOKALO I, GABRIEL F, PANDI S, *et al.* Reliable feedback mechanisms for routing protocols with network coding[C]. *IEEE International Symposium on Power Line Communications and ITS Applications*, Manchester, UK, 2018: 1–7. doi: 10.1109/ISPLC.2018.8360234.
- [7] NGETH R, KURKOSKI B M, LIM Y, *et al.* Random linear network coding over compute-and-forward in multi-source multi-relay networks[C]. *The 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, Valencia, Spain, 2017: 805–810. doi: 10.1109/IWCMC.2017.7986388.
- [8] HO T, MEDARD M, KOETTER R, *et al.* A random linear network coding approach to multicast[J]. *IEEE*

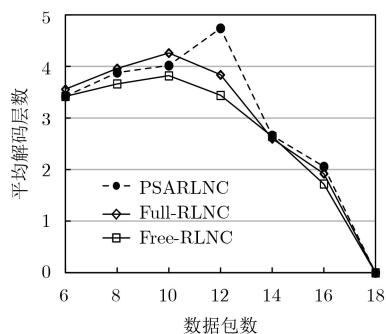


图8 平均解码层数随数据包数的变化

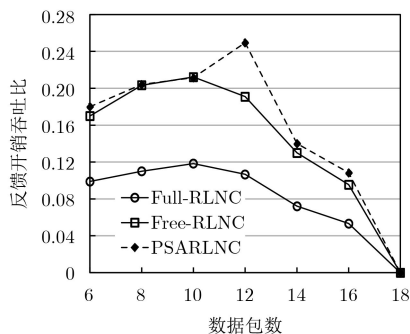


图9 反馈开销比随数据包数的变化

- Transactions on Information Theory*, 2006, 52(10): 4413–4430. doi: [10.1109/tit.2006.881746](https://doi.org/10.1109/tit.2006.881746).
- [9] WANG M and LI Baochun. R2: Random push with random network coding in live peer-to-peer streaming[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(9): 1655–1666. doi: [10.1109/JSAC.2007.071205](https://doi.org/10.1109/JSAC.2007.071205).
- [10] SORENSEN C W, LUCANI D E, FITZEK F H P, *et al.* On-the-fly overlapping of sparse generations: A tunable sparse network coding perspective[C]. The 80th Vehicular Technology Conference, Vancouver, Canada, 2014: 1–5. doi: [10.1109/VTCFall.2014.6966091](https://doi.org/10.1109/VTCFall.2014.6966091).
- [11] ZHAN Cheng and GAO Kailun. Video delivery in heterogeneous wireless networks with network coding[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(5): 472–475. doi: [10.1109/LWC.2016.2586485](https://doi.org/10.1109/LWC.2016.2586485).
- [12] TASSI A, CHATZIGEORGIOU I, and LUCANI D E. Analysis and optimization of sparse random linear network coding for reliable multicast services[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(1): 285–299. doi: [10.1109/TCOMM.2015.2503398](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2015.2503398).
- [13] LI Bin, LI Hongxiang, and ZHANG Ruonan. Adaptive random network coding for multicasting hard-deadline-constrained prioritized data[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(10): 8739–8744. doi: [10.1109/TVT.2015.2509503](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2509503).
- [14] LI Bin, BAN Dengke, and ZHANG Ruonan. Efficient scheduling for multicasting multimedia data with adaptive random liner network coding in relay-aided network[C]. 2015 Wireless Communications and Networking Conference, New Orleans, USA, 2015: 1584–1589. doi: [10.1109/WCNC.2015.7127704](https://doi.org/10.1109/WCNC.2015.7127704).
- [15] LI Bin, LI Xiaoping, ZHANG Ruonan, *et al.* Joint power allocation and adaptive random network coding in wireless multicast networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(4): 1520–1533. doi: [10.1109/tcomm.2017.2785238](https://doi.org/10.1109/tcomm.2017.2785238).
- [16] YU Mingchao, SADEGHI P, and SPRINTSON A. Feedback-assisted random linear network coding in wireless broadcast[C]. 2016 IEEE GLOBECOM Workshops, Washington, USA, 2017: 1–6. doi: [10.1109/GLOCOMW.2016.7848908](https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2016.7848908).
- [17] ESMAEILZADEH M, SADEGHI P, and ABOUTORAB N. Random linear network coding for wireless layered video broadcast: General design methods for adaptive feedback-free transmission[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(2): 790–805. doi: [10.1109/tcomm.2016.2630062](https://doi.org/10.1109/tcomm.2016.2630062).
- [18] GARRIDO P, LUCANI D E, and AGÜERO R. Markov chain model for the decoding probability of sparse network coding[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(4): 1675–1685. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2657621](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2657621).
- [19] FEIZI S, LUCANI D E, SORENSEN C W, *et al.* Tunable sparse network coding for multicast networks[C]. 2014 International Symposium on Network Coding (NetCod), Aalborg, Denmark, 2014. doi: [10.1109/NETCOD.2014.6892129](https://doi.org/10.1109/NETCOD.2014.6892129).
- 王 练: 女, 1976年生, 博士, 副教授, 研究方向为网络编码, 无线网络安全.
- 张 贺: 男, 1991年生, 硕士生, 研究方向为网络编码.
- 张 昭: 男, 1993年生, 硕士生, 研究方向为安全网络编码.
- 张勋杨: 男, 1993年生, 硕士生, 研究方向为网络编码.