

## 多源多中继无线网络中基于随机线性网络编码的调度方案

王 练<sup>\*①②</sup> 梁申虎<sup>①</sup> 彭代渊<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(重庆邮电大学计算机科学与技术学院 重庆 400065)

<sup>②</sup>(西南交通大学信息科学与技术学院 成都 611756)

**摘 要:** 现有多中继无线网络中传输调度方案主要针对单信源且转发链路状态相同的情况,多采用顺序转发的调度方式,传输效率较低。针对此问题,该文提出一种基于随机线性网络编码的优先级调度方案。该方案在不同的传输阶段,利用信息包接收状态或编码向量之间的线性关系生成反馈信息,计算中继节点的有效信息包数。在转发链路状态不同的情况下,综合考虑各中继节点的有效信息与链路传输可靠性,确定优先级,从而完成调度。该方案实现了多中继对多信源信息的协同转发,在转发链路状态差异较大时,能自适应地选择最优转发节点和路径,提高信息包的传输成功率。仿真结果表明,相比传统基于单信源或顺序调度的方案,该方案能有效提高网络吞吐量,减少重传次数。

**关键词:** 无线网络; 随机线性网络编码; 调度; 多源多中继

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)03-0532-07

DOI: 10.11999/JEIT160454

## Scheduling Scheme for Multi-source Multi-relay Wireless Network Based on Random Linear Network Coding

WANG Lian<sup>\*①②</sup> LIANG Shenhu<sup>①</sup> PENG Daiyuan<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(School of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

<sup>②</sup>(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** Current scheduling schemes in multi-relay wireless network mainly focus on single source wireless network with the same link status. Furthermore, the sequential-forward scheduling scheme is used usually, and the transmission efficiency is comparatively low. To solve this problem, a priority scheduling scheme based on random linear network coding is proposed. In different transmission stages, the feedback information is generated according to the packets accepting state or the linear relation among the encoding vectors. The number of the effective packets of the corresponding relay node is calculated. In the condition of different link status, the effective information of each relay node and the link transmission reliability is taken into consideration comprehensively to generate the priority index and complete scheduling. This scheme can realize cooperation transmission in multi-relays for multi-sources information. When the link status difference is obvious, the optimal forwarding node and the path can be adaptively chosen to improve the information transmission efficiency. According to the simulation results, this scheme can effectively improve network throughput and reduce the number of retransmission compared with the traditional scheduling schemes for single source wireless network.

**Key words:** Wireless network; Random linear network coding; Scheduling; Multiple-source multiple-relay

### 1 引言

Ahlsvede 等人<sup>[1]</sup>在 2000 年提出了网络编码的思想,并证明其可以逼近最大理论传输容量。随着研

究的深入,网络编码被广泛应用于无线网络传输。其中,文献[2-4]指出将网络编码应用于无线广播重传能有效提升无线传输吞吐量。中继协作传输的应用实现了远距离无线网络的有效通信<sup>[5,6]</sup>。在此基础上,Fan 等人<sup>[7]</sup>率先研究了机会式网络编码在中继协作多播中的应用,考虑了两个接收端的情况。随后,Lu 等人<sup>[8,9]</sup>提出该场景下基于随机线性网络编码(Random Linear Network Coding, RLNC)的高效调度方案,并将该方案拓展到双小区广播系统,Huang 等人<sup>[10]</sup>改进此方案,以稀疏矩阵为基础,采用确定

收稿日期: 2016-05-03; 改回日期: 2016-11-11; 网络出版: 2017-01-11

\*通信作者: 王练 wanglian@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2015AA01A705), 国家自然科学基金(61571375)

Foundation Items: The National High-Technology Research and Development Program of China (2015AA01A705), The National Natural Science Foundation of China (61571375)

性的算法获取线性无关编码向量,降低了编解码复杂度。由于网络节点的分布式特性,总可能出现多个信源同时传输信息。针对该情况,Amerimehr等人<sup>[1]</sup>对使用网络编码的双向单中继无线网络调度进行了时延和吞吐量的分析,但只适合于两者或两者为一组的相互通信。Wei等人<sup>[12]</sup>提出一种多源多中继无线网络中计算与转发的网络编码信道设计方案,用基于候选集的搜索算法确定网络编码系数,提高了网络传输速率,对于调度只是概念性的涉及。Ding等人<sup>[13]</sup>提出了多中继无线网络中基于网络编码的自适应转发调度(Adaptive Forwarding with Network Coding, AF-NC)和结合自动重传请求(Automatic Repeat Quest, ARQ)的自适应转发重传调度(Adaptive Forwarding with Network Coding and Retransmission, AFR-NC),减少了传输所需时隙,但该方案中的多中继转发和重传均是采用顺序调度,对给定的多源模型,也只是依次单独执行各源节点的传输。Aslam等人<sup>[14]</sup>将多跳转发抽象为马尔科夫随机过程,对使用随机网络编码的多源多跳协作网络的网络覆盖进行了研究,但要求每跳能够解码原始信息的节点不少于源节点数才能保证信息继续传输。

上述多中继调度方案多是基于顺序转发,但广播会使多个中继节点有相同的信息,若按该方法总会优先传输顺序靠前的中继节点所拥有的有效信息包,这并不是最理想的方式,传输成功率也会受到很大影响。此外,这些调度方案只适用于单信源且具有相同转发链路状态的网络环境,与实际网络传输有差异。在上述研究基础上,本文研究了不同链路状态下的多中继协作传输,针对多信源信息在多中继节点的转发,以提高吞吐量和可靠性为目标,提出一种多源多中继无线网络中基于随机线性网络编码的优先级调度方案(Priority Scheduling based on Network Coding, PSNC)。该方案根据不同的转发链路状态,通过预算有效信息包的最优到达数实现调度。为了验证 PSNC 方案的有效性,本文对吞吐量和重传次数进行了分析和仿真。结果表明,与基于网络编码的多中继顺序调度(Order Scheduling based on Network Coding, OSNC)、基于网络编码的多中继随机转发调度(Random Scheduling based on Network Coding, RSNC)以及 AF-NC 方案相比,所提方案在一定条件下吞吐量和可靠性都具有明显优势。

## 2 网络模型

本文采用多源多中继无线网络模型,如无线传

感器网络。 $M$ 个相对集中的源节点 $\mathbf{S} = \{S_1, S_2, \dots, S_M\}$ 代表 $M$ 个传感器,构成一个发送源集, $N$ 个较为分散的中继节点 $\mathbf{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_N\}$ 以及一个接收节点 $D$ ,如图1所示。假设 $D$ 不在 $\mathbf{S}$ 的覆盖范围内,只能通过 $N$ 个中继协作传输实现通信。相对于所有源节点, $N$ 个中继节点之间是公平对等的,且无法直接通信,都以半双工模式工作。为避免干扰,源节点以正交频分复用方式进行传输。源节点 $S_j$ 到中继节点 $R_i$ 的链路丢包率表示为 $P_{S_j, R_i}$ ;各中继节点到 $D$ 节点的链路丢包率表示为 $P_{R_i, D}$ ( $j \in \{1, 2, \dots, M\}, i \in \{1, 2, \dots, N\}$ ),链路丢包率之间相互独立。此外,假设同一链路上的重传信息包与初始传输具有相同的丢包率,每一个时隙只发送一个数据包。丢包信息通过可靠的反馈信号 ACK/NAKs 获取。

PSNC 方案分为初始阶段和重传阶段。初始阶段,所有源节点分别广播信息包给中继节点,中继节点缓存收到的信息包;根据各中继节点的信息包覆盖数和各转发链路的丢包率两个条件进行初始调度,转发有效信息给 $D$ 节点。在重传阶段,源节点根据反馈信息,重传所有中继节点都丢失的信息包;再利用 $D$ 节点和各个中继节点的全局编码矩阵之间的向量线性关系与不同的链路丢包率确定调度优先级,获取重传节点,并对该节点已经收到信息进行再次随机编码后发送给 $D$ 。两个阶段采用完全不同于现有方案的分阶段反馈方式和预算优先级的调度策略。

为便于下文分析,设各源节点开始都发送 $L$ 个 RLNC 包。用 $\mathbf{G}_{m,k} = \sum_{j=1}^L \alpha_{k,j} W_j$ 表示由源节点 $S_m$ 产生的第 $k$ 个初始编码信息包, $\mathbf{a}_k = [\alpha_{k1}, \alpha_{k2}, \dots, \alpha_{kL}]$ 为编码向量。无线广播特性和模型条件使每个中继节点都可能收到所有源节点发送的信息包。为了避免多个源节点信息的混合,同时实现快速处理,在每个中继节点处动态设置 $M$ 个缓存队列,分别缓存来自 $M$ 个源节点的信息包。在缓存信息包的同时也对信息包接收状态做出表征,可以从中同时获得编码矩阵和接收状态矩阵。如图2是中继节点 $R_i$ ( $i =$

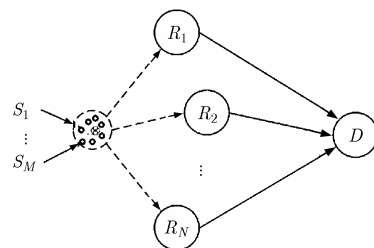


图1 系统模型

$R_i$		接收状态			缓存队列
	$S_1$	0	...	0	...
	$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$	$\vdots$
	$S_M$	0	...	0	...

图 2  $R_i$  的缓存结构

1, 2, ..., N) 的缓存结构图, 包括接收状态部分和缓存队列部分。当源节点  $S_m$  发送完第  $k$  个信息包, 若  $R_i$  成功接收, 则  $R_i$  的第  $m$  个缓存队列缓存该信息包, 同时更新状态矩阵的第  $m$  行第  $k$  位为 1, 否则置为 0。

使用确定性网络编码时会采用接收状态表征信息包接收情况, 优点是简单且易实现。本方案采用 RLNC, 在传输过程中可局部使用该表示方法, 是由于没有进入重传阶段前, 所有已传输的原始编码信息包都是唯一且确定的。因此, 使本方案的编码传输过程得到局部简化。

### 3 优先级调度方案

PSNC 方案是从各个中继节点对源节点信息的覆盖情况出发, 利用  $D$  节点与各中继节点之间的原始信息接收差异以及各转发链路的不同丢包率选取最优中继传输点。其优势主要体现在, 整个传输方案都从多个源节点发送信息的角度出发, 考虑多缓存队列, 使基于 RLNC 的传输方案变得简单。此外, 所有的转发调度是建立在传输最优到达的选择机制之上, 充分利用网络资源的同时提高传输吞吐量。本节主要的符号含义, 如表 1 所示。

#### 3.1 初始传输调度

根据各中继节点的接收状态矩阵了解相应的信息包接收情况, 通过调度中继节点将已经收到的信息包转发给  $D$ 。在  $D$  节点没有接收到任何信息包之

表 1 符号的含义

符号	含义
$S_j$	第 $j$ 个源节点
$R_i$	第 $i$ 个中继节点
$P_{S_j, R_i}$	$S_j$ 到 $R_i$ 的链路丢包率
$P_{R_i, D}$	中继节点 $R_i$ 到 $D$ 的链路丢包率
$E(R_i)$	$R_i$ 的编码矩阵
$E(D)$	$D$ 的编码矩阵
$C_{R_j}$	中继对原始信息的覆盖
$C_x$	节点 $x$ 的接收状态矩阵
$C^d$	两个节点之间的接收状态差异
$K_{R_i}$	$R_i$ 节点能为 $D$ 提供的有效信息包数
$V_i$	中继对第 $i$ 个源节点所发信息的覆盖数
$H(i)$	$R_i$ 能为 $D$ 提供线性无关的编码向量数

前, 其接收状态矩阵  $C_D$  为  $M \times L$  的零矩阵。

**定义 1** 所有中继节点的接收状态矩阵相对应元素进行逻辑或运算的结果表示中继对原始信息的覆盖  $C_{R_j}$ 。

$$C_{R_j} = C_{R_1} \vee C_{R_2} \vee \dots \vee C_{R_N} \quad (1)$$

$C_{R_j}$  为全“1”矩阵表示中继节点对原始信息形成完全覆盖。

**定义 2** 两个节点的状态矩阵之差表示它们的信息包接收差异, 即  $C^d = C_i - C_j$ 。

调度过程需要计算  $D$  节点和各中继节点的信息接收差异  $C_i^d = C_{R_i} - C_D$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。  $C_i^d$  的元素可能出现如下值 ( $m$  和  $n$  为矩阵元素下标):

$C_i^d(m, n) = 1$ :  $R_i$  有该状态位对应的信息包,  $D$  没有该信息包;

$C_i^d(m, n) = 0$ :  $R_i$  有对应信息包且  $D$  也有, 或者是  $R_i$  没有对应信息包且  $D$  也无该包;

$C_i^d(m, n) = -1$ :  $R_i$  没有对应信息包,  $D$  有该包。

转发只关注中继节点  $R_i$  能否为  $D$  节点提供有效 ( $D$  没有的) 信息包, 因此状态位为 0 和 -1 的情况可以不管, 为方便计算处理, 将状态位为 -1 的全部置为 0。在此情况下, 要求被选转发节点只转发状态位为 1 的信息包,  $R_i$  节点能为  $D$  提供的新信息包数是  $C_i^d$  中所有元素之和  $K_{R_i} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^L C_i^d(m, n)$ 。若  $K_{R_i} > 0$ , 将  $R_i$  加入集合  $R^a$ 。最后, 根据式(2)确定转发节点。

$$A = \arg \max_{R_j \in R^a} \left\{ (1 - P_{R_j, D}) \cdot K_{R_j} \right\} \quad (2)$$

由式(2)可知, 被选节点是所有候选节点中理论上能成功传输最多新信息包给  $D$  的。被选节点完成转发后, 更新  $C_D$  和候选节点集。根据变化结果重复调度步骤, 获取下一个转发节点, 直到  $C_D$  与  $C_{R_j}$  相等或候选节点集为空, 就结束初始阶段。由上文可知,  $D$  已获取的信息包不会再被后续节点转发, 避免了信息包的重复发送。通过调度, 减少了参与转发的中继节点数, 让传输更集中, 也更有效。初始传输调度的主要伪代码如表 2 所示。

#### 3.2 重传调度

根据系统条件, 若信息包在  $S$  到  $R$  的传输过程中丢失, 则这些信息包在  $D$  处必然是丢失的。因此, 为使  $D$  节点能快速有效地解码出所有原始信息包, 必须先满足所有的中继节点共同形成对原始信息的完全覆盖, 而对单个中继节点收到多少信息, 以及能否解码, 并不直接依赖。若未形成完全覆盖, 需依靠源节点重传有效包达到该状态。由  $C_{R_j}$  定义,

表2 初始调度主要伪代码

```

输入:  $C_{R_1}, C_{R_2}, \dots, C_{R_N}$ 
输出:  $C_D$ 
//初始调度
 $C_{R_j} = C_{R_1} \vee C_{R_2} \vee \dots \vee C_{R_N}$ ; //获得  $R$  对信息的覆盖  $C_{R_j}$ 
 $k \leftarrow 1$ ;
 $C_D \leftarrow 0$ ; //  $C_D$  初始为  $M \times L$  的零矩阵
while(1)
  for ( $i = 1, 2, \dots, \text{length}(R^t)$ ) //初始  $R^t = \{R_1, R_2, \dots, R_N\}$ 
     $C_i^d \leftarrow C_{R_i} - C_D$ ; //计算  $R_i$  和  $D$  的信息包差异
    由  $C_i^d$  得出  $K_{R_i}$ ; //  $R_i$  可提供的有效信息包数
    if  $K_{R_i} > 0$ 
       $R^a \leftarrow R^a \cup R_i$ ; //  $R_i$  加入集合  $R^a$ 
    endif
  endfor
   $A \leftarrow \arg \max_{R_i \in R^a} \{ (1 - P_{R_i, D}) \cdot K_{R_i} \}$ ; //获得最佳转发节点
  转发  $a$  缓存的有效信息包;
   $k \leftarrow k + 1$ ; //记录转发节点数
  更新  $C_D$ ;
  if  $C_D = C_{R_j} \parallel k = N$ 
    Break;
  else
     $R^t \leftarrow R^a - A$ ; //去除已转发的  $A$  节点
  endif
endwhile

```

用  $V_m = \sum_{n=1}^L C_{R_j}(m, n)$  ( $m \in \{0, 1, \dots, M\}$ ) 表示  $S_m$  发送的数据包被中继节点覆盖(数据包被至少一个中继节点成功接收即为成功覆盖)的数量, 并反馈给源节点。若  $V_m < L$ , 则说明源节点  $S_m$  的待传信息没有被完全正确接收, 至少要重传  $(L - V_m)$  个 RLNC 包。

完全覆盖原始信息后的中继节点, 通过重传调度, 转发有效信息给  $D$ 。此时,  $D$  和各中继节点已接收到各源节点的部分或全部信息。经过  $S$  到  $R$  的重传, 已经打破了初始阶段的接收状态反馈。根据文献[15]可知 RLNC 是在有限域  $GF(2^8)$  内随机选取编码系数, 生成两个线性相关编码包的概率可以小到忽略不计, 而生成两个相同编码包的概率还要小很多, 因此不能像确定性网络编码那样, 固定性地重传丢失的那些信息包。那么, 再发送确定性的反馈信息也就没有意义, 这也是 RLNC 最根本的特点。所以, 在接下来的传输中将编码向量之间的线性关系作为新的反馈信息。

反馈信息是所有源节点信息的整体反馈。因此, 将  $D$  中收到编码包对应的编码向量按矩阵串联的方法进行对角串联得到分块对角矩阵  $\mathbf{E}(D)$ , 一个缓冲区的编码向量对应一个块, 以便能在一个编码矩阵中反应出多源节点的整体编码信息。若  $D$  成功接收

所有信息包, 得到的  $\mathbf{E}(D)$  如式(3)所示。

$$\mathbf{E}(D) = \begin{pmatrix} \alpha_{11}^1 & \dots & \alpha_{1L}^1 & & & \\ \vdots & \ddots & \vdots & \dots & & 0 \\ \alpha_{L1}^1 & \dots & \alpha_{LL}^1 & & & \\ & \vdots & & \ddots & & \\ & & & & \alpha_{11}^M & \dots & \alpha_{1L}^M \\ & & & & & & \vdots \\ 0 & \dots & & & \vdots & \ddots & \vdots \\ & & & & \alpha_{L1}^M & \dots & \alpha_{LL}^M \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, 每个块儿有  $M$  个编码向量, 其秩  $\text{rank}(\mathbf{E}(D)) = M \times L$ ; 否则,  $\text{rank}(\mathbf{E}(D)) < M \times L$ , 就需要中继节点重传有效信息包。可能存在多个中继节点都能为  $D$  提供有效信息包(也称线性无关包, 编码包的编码向量之间线性无关), 选择重传中继节点时, 根据各节点能提供的线性无关包数和链路丢包率, 每次选择一个理论上能成功传输更多线性无关包到  $D$  的中继节点。相同数量且分散到多个节点的线性无关包, 集中在一个更为完整的中继节点和更可靠的传输链路发送, 会让更少的中继节点参与重传, 从而减少了反馈信息以及信息传输链路的切换所带来的开销; 此外, 一次性处理多个源节点信息包重传的同时提高了传输吞吐量和可靠性。具体选择过程是根据式(4), 式(5)和式(6)。

$$(\mathbf{E}(D); \mathbf{E}(R_i)) = \begin{pmatrix} \mathbf{E}(D) \\ \mathbf{E}(R_i) \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$H(i) = \text{rank}((\mathbf{E}(D); \mathbf{E}(R_i))) - \text{rank}(\mathbf{E}(D)) \quad (5)$$

$$B = \arg \max_{R_i \in U} \{ (1 - P_{R_i, D}) \cdot H(i) \} \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{E}(R_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 表示中继节点  $R_i$  收到的所有编码包对应的整体分块对角阵, 与  $\mathbf{E}(D)$  的形成相同。式(4)表示矩阵  $\mathbf{E}(D)$  和  $\mathbf{E}(R_i)$  进行垂直串联。式(5)中, 用串联矩阵  $\mathbf{E}(D); \mathbf{E}(R_i)$  的秩减去  $\mathbf{E}(D)$  的秩得到  $H(i)$ , 表示  $R_i$  能为  $D$  提供线性无关编码包的数量。由线性代数可知  $H(i) \geq 0$  一定成立, 当  $H(i) > 0$  时将  $R_i$  加入集合  $U$ , 再根据式(6)找到成功传输最大期望值对应的中继节点。

在重传之前, 先再次编码被选节点已有的信息。根据 RLNC 的原理, 当接收节点的编码矩阵达到满秩则该矩阵可逆, 就能实现完全解码。对于中继节点  $R_i$ , 若收到  $Q$  个编码包后, 对这些编码包再次编码并不能生成与原  $Q$  个编码包线性无关的新编码包。对应到向量, 由原有的  $Q$  个线性无关向量随机任意表示而成的新向量与原  $Q$  个向量一定存在线性相关关系。由此看来, 重新编码无实际意义。但当  $R_i$  可以为  $D$  节点提供线性无关信息包时, 对  $R_i$  中所有

编码包重新编码后获得的任意一个编码包都能使  $\text{rank}(\mathbf{E}(D))$  增加 1, 促进解码。因此, 为了使重传更有效, 对被选节点原有的信息再次编码后再发送。被选节点重传后, 若仍不能完全解码, 重复该调度过程获取新的重传节点, 直到  $D$  能完全解码为止。重传调度过程的主要伪代码如表 3 所示。

当原始传输的文件很大时, 同时处理多源节点的信息会对节点的资源提出更高的要求, 为了保证有效的调度传输, 采取分块传输模式, 将各源节点的文件分批次进行传输。

表 3 重传调度主要伪代码

```

输入:  $C_{R_j}, C_D$ 
输入:  $\text{rank}(\mathbf{E}(D))$ 
//重传调度
while ( $C_{R_j}$  不为全 1 矩阵) //未完全覆盖
  for ( $q = 1, 2, \dots, M$ )
     $V_m = \sum_{n=1}^L C_{R_j}(m, n)$ ; //  $S_m$  所传信息被覆盖的数量
    if  $V_m < L // S_m$  的信息存在绝对丢失
       $S_m$  至少重传  $(L - V_m)$  个编码包;
    endif
     $R_i$  根据接收包更新  $C_{R_i}$ ; // ( $i = 1, 2, \dots, N$ )
    更新  $C_{R_j}$ ;
  endfor
endwhile
//达到完全覆盖
 $U = \emptyset$ ;
构建  $\mathbf{E}(D)$ ; //  $D$  的编码矩阵
构建  $\mathbf{E}(R_i) (i = 1, 2, \dots, N)$ ; //  $R_i$  的编码矩阵
while ( $\text{rank}(\mathbf{E}(D)) < M \times L$ ) //  $D$  可完全解码就结束
  for ( $i = 1, 2, \dots, N$ )
     $H(i) \leftarrow \text{rank}(\mathbf{E}(D); \mathbf{E}(R_i)) - \text{rank}(\mathbf{E}(D))$ ; // 能提供
    给  $D$  的线性无关包数
    if  $H(i) > 0$ 
       $U \leftarrow U \cup R_i$ ;
    endif
  endfor
   $B = \arg \max_{R_i \in U} \{(1 - P_{R_i, D}) \cdot H(i)\}$ ;
  再次编码  $B$  中的信息包;
  发送至少  $H(i)$  个编码包给;
  更新  $\mathbf{E}(D)$ ;
endwhile

```

## 4 性能分析

### 4.1 吞吐量

在 PSNC 方案中, 其传输吞吐量, 用从源节点开始传输到  $D$  成功接收所有信息包为止, 单位时隙内成功传输的信息包数  $\eta$  来表征,  $\eta$  越大, 吞吐量越大。

$$\eta = (M \times L) / T \quad (7)$$

其中,  $T$  表示成功传输  $M \times L$  个信息包所需要的总时隙。由上文描述可知, 一个数据包被中继节点成功覆盖的概率为  $1 - \prod_{i=1}^N P_{S_j, R_i}$ , 则一个源节点经过  $Y$  次传输使  $L$  个信息包被成功完全覆盖的概率为

$$P = \binom{Y}{L} \left[ 1 - \prod_{i=1}^N P_{S_j, R_i} \right]^L \left( \prod_{i=1}^N P_{S_j, R_i} \right)^{Y-L} \quad (8)$$

设达到完全覆盖所需的时隙设为  $T_1$ , 转发所需时隙为  $T_2$ , 总的传输时隙  $T = T_1 + T_2$ 。根据式(8)可以推出  $T_1$ 。转发信息包时, 系统状态可以被认为所有  $M \times L$  个原信息包被随机分配给了  $N$  个中继节点。由于链路状态的不同,  $T_2$  只能通过具体转发情况得出。假设原数据包数经过初始传输后, 全部被中继节点覆盖, 此时仅消耗最少的  $L$  个传输时隙, 同时, 中继转发全部由丢包率最小链路完成,  $T_2$  的理论值为  $ML / 1 - \min_{R_i \in \{1, 2, \dots, N\}} \{P_{R_i, D}\}$ , 从而得到  $T$  的最小期望。

$$E(T) \geq L + \frac{ML}{1 - \min_{R_i \in \{1, 2, \dots, N\}} \{P_{R_i, D}\}} \quad (9)$$

同理, 若转发数据包全部由丢包率最大的链路传输给接收端, 再加上初始阶段的所需传输时隙期望  $L / 1 - \prod_{i=1}^N P_{S_j, R_i}$ , 可以得出  $T$  的最大期望值。

$$E(T) \leq \frac{L}{1 - \prod_{i=1}^N P_{S_j, R_i}} + \frac{ML}{1 - \max_{R_i \in \{1, 2, \dots, N\}} \{P_{R_i, D}\}} \quad (10)$$

根据式(9)和式(10), 最终可得到  $\eta$  的范围。

### 4.2 重传次数

重传次数由两部分构成, 一是各中继节点在初始阶段未完全覆盖原始信息, 源节点重传信息包达到该状态的重传次数; 二是中继节点重传阶段传输信息包的次数。因为本方案考虑同一链路上的重传信息包和初始传输具有相同的丢包率, 加上各转发链路的状态不同, 使得转发过程具有不确定性, 所以无法给出所需重传次数的准确表达式, 只能通过仿真结果进行描述。

### 4.3 复杂度分析

在 PSNC 方案中, 对于初始调度, 先根据  $M \times L$  的状态矩阵获取中继节点覆盖信息, 则计算复杂度为  $O(ML)$ ; 再利用中继节点和目的节点的信息包差异选择转发中继节点, 由于包括  $N$  个中继节点, 其计算复杂度是  $O(NML)$ 。在重传调度部分, 首先通过矩阵  $C_{R_j}$  获得各源节点的丢失数据包数, 复杂度

为  $O(ML)$ ; 通过整体编码矩阵选择重传节点的计算复杂度则达到  $O(M^2L^2)$ 。整个过程中, 中继节点用于存储的数据包的空间复杂度为  $O(ML)$ 。相比较于单源节点的 AF-NC 方案, 由于所提算法从多源节点出发, 那么处理的信息包数增加, 信息反馈矩阵的规模变大, 因此, 本文算法的计算复杂度和缓存空间都有所增加, 而对于 OSNC 和 RSNC, 除了调度过程中的策略不同, 其他条件与本文算法都是相同的, 所以计算复杂度和缓存数据所需空间均在一个量级。表 4 给出了相关调度方案的复杂度, 由于相比较的方案均采用 RLNC, 关于 RLNC 部分的相关复杂度分析请参考文献[15]。

表 4 算法时间和空间复杂度

复杂度	AF-NC	OSNC	RSNC	PSNC
时间	$O(NML)$	$O(M^2L^2)$	$O(M^2L^2)$	$O(M^2L^2)$
空间	$O(L)$	$O(ML)$	$O(ML)$	$O(ML)$

## 5 仿真结果

本文采用 Matlab R2015a 仿真软件, 测试计算机为 Intel Core i7-5500U, 8 G RAM, Windows7 操作系统。在此环境下, 将本文 PSNC 方案与 OSNC, RSNC 以及 AF-NC 方案进行了仿真对比和分析。由于编码系数的随机性和信息包丢失的偶然性, 导致相同条件下的两次完整传输在吞吐量和重传次数上可能有明显差异。为了更准确地分析系统性能, 采用平均吞吐量和平均重传次数作为指标。根据仿真条件, 设  $M = 4$ ,  $N = 5$ , 链路丢包率  $P_{S_j, R_i} = 0.3$  ( $j \in \{1, 2, \dots, M\}$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ ),  $P_{R_n, D} = p(i)$ ,  $p$  是一个随机序列的丢包率数组 [0.65, 0.40, 0.20, 0.35, 0.50]。通过多次仿真实验和数据处理后得到以下结果。

图 3(a)中, OSNC 方案和 AF-NC 方案的吞吐量很接近, 且明显低于其他方案。而 PSNC 方案的吞吐量最大, 因为同时考虑了中继节点能否提供有效信息、提供多少有效信息和信息包传输到达率, 使传输更集中, 成功率更高。RSNC 方案的吞吐量介于 PSNC 和 AF-NC 之间, 原因在于随机调度产生的结果肯定低于每次按最佳选择的 PSNC 方案, 基于顺序转发的 OSNC 和 AF-NC 方案极其依赖节点序列, 而随机调度使每次的结果或好或坏, 但 RSNC 方案获得较大吞吐量的概率要大, 平均结果更好。

图 3(b)是各方案的平均重传次数随传输数据包

数变化的对比结果。4 种方案的平均重传次数均随原数据包数的增加而增加, 当原数据包数为 20 时, 各方案的平均重传次数相差较小; 而原数据包数增加到 120 时, PSNC 的平均重传次数明显优于 RSNC, AF-NC 和 OSNC 方案。随着原数据包数的增加 PSNC 的增加趋势明显缓和很多, 优势更加突出。在相同的条件下, PSNC 会选择低丢包率的链路进行转发, 从而减少丢失, 所需重传次数减少。

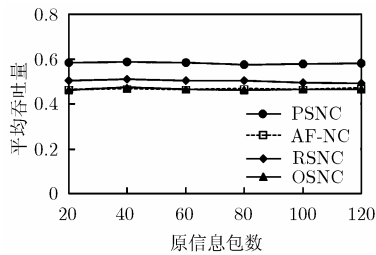
其他条件不变, 平均吞吐量和平均重传次数随中继节点数变化的对比如图 4 所示, 随中继节点数的增加, 4 种方案的吞吐量有所增大, 而平均重传次数不断减少, 最终都逐渐趋于平稳。说明一定范围内, 适当增加中继节点数量可以减少数据包的绝对丢失, 从而提高吞吐量, 减少重传次数。但系统性能由多个条件共同决定, 中继节点数所带来的影响只是一定程度上的。

平均吞吐量和平均重传次数随转发链路状态差异变化(转发链路丢包率的平均值和方差都增加, 以方差和平均值的比值为横坐标, 表示转发链路之间状态差异在增大)的对比, 如图 5 所示。

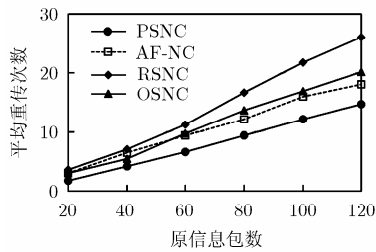
从图 5(a)可看出, 其他条件不变, 各转发链路状态差异不断增大时, 由于丢包率的增加, 使吞吐量整体呈现下降的趋势, 但 PSNC 方案的优势会越来越明显, 下降的趋势较为平缓。如图 5(b)所示, PSNC 的平均重传次数优势也随着链路状态差异的增大而逐渐明显, 整体呈增加趋势是由于丢包率是增大的。OSNC 和 AF-NC 方案到后边急剧上升主要是由于随着丢包率和丢包率差异的增大使原本就存在劣势被继续放大, 而 RSNC 方案的随机方式在链路集不大的情况下不会持续出现极端劣势。

## 6 结论

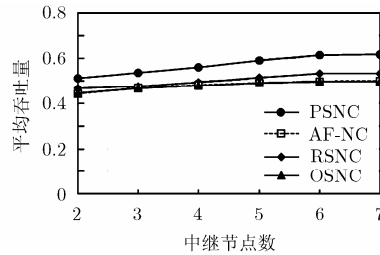
本文改进了多源多中继无线网络传输模型, 基于随机线性网络编码提出了优先级调度方案 PSNC。该方案综合考虑了节点的有效信息包数与链路传输可靠性, 在转发链路状态不同的情况下, 优先选择有效信息包数较多且链路可靠性较高的节点传输信息, 使传输更集中, 更有效, 从而提高信息包的传输成功率, 减少反馈次数和传输次数。分析与仿真结果表明, PSNC 具有吞吐量高, 可靠性强的特点, 使多源多中继无线网络协作传输性能得以明显提升。特别在丢包率较高, 转发链路间状态差异较大的无线网络环境下, 优势会更加突出。该方案可推广到移动通信网络、Ad hoc 网络等。



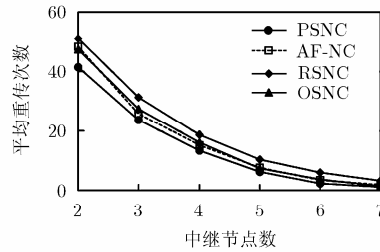
(a)平均吞吐量比较



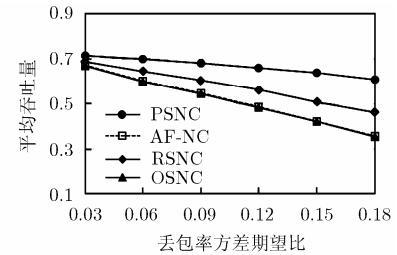
(b)平均重传次数比较



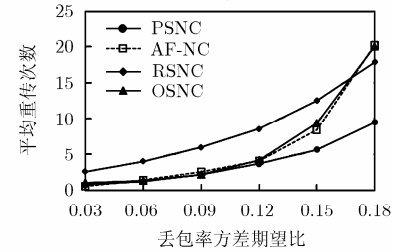
(a)平均吞吐量比较



(b)平均重传次数比较



(a)平均吞吐量比较



(b)平均重传次数比较

图 3 不同原信息包个数下的性能对比

图 4 不同中继节点个数下的性能对比

图 5 不同转发链路状态差异下的性能对比

### 参考文献

- [1] AHLWEDE R, CAI N, 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] NGUYEN D, TRAN T, NGUYEN T, *et al.* Wireless broadcast using network coding[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(2): 914-925. doi: 10.1109/TVT.2008.927729.
  - [3] 周志恒, 周亮. 多播网络中基于网络编码的高效丢失恢复机制[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(8): 1962-1967. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.01233.  
ZHOU Zhiheng and ZHOU Liang. Efficient loss recovery based on network coding in multicast networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(8): 1962-1967. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.01233.
  - [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] KRAMER G, GASTPAR M, and GUPTA P. Cooperative strategies and capacity theorems for relay networks[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(9): 3037-3063. doi: 10.1109/TIT.2005.853304.
  - [6] LIANG Y and VEERAVALLI V V. Cooperative relay broadcast channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(3): 900-928. doi: 10.1109/TIT.2006.890726.
  - [7] FAN P, ZHI C, WEI C, *et al.* Reliable relay assisted wireless multicast using network coding[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(5): 749-762. doi: 10.1109/JSAC.2009.090615.
  - [8] LU L, XIAO M, RASMUSSEN L K, *et al.* Efficient scheduling for relay-aided broadcasting with random network codes[C]. 2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, Toronto, Canada, 2011: 1815-1819. doi: 10.1109/PIMRC.2011.6139821.
  - [9] LU L, SUN F, XIAO M, *et al.* Relay-aided multi-cell broadcasting with random network coding[C]. IEEE International Symposium on Information Theory and its Applications, Taichung, China, 2010: 957-962. doi: 10.1109/ISITA.2010.5649536.
  - [10] HUANG L and SUNG C W. Scheduling and network coding for relay-aided wireless broadcast: Optimality and heuristic[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(2): 674-687. doi: 10.1109/TVT.2013.2281392.
  - [11] AMERIMEHR M H and ASHTANI F. Delay and throughput analysis of a two-way opportunistic network coding-based relay network[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(5): 2863-2873. doi: 10.1109/TWC.2014.040914.121461.
  - [12] WEI L and CHEN W. Compute-and-forward network coding design over multi-source multi-relay channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(9): 3348-3357. doi: 10.1109/TWC.2012.070912.111948.
  - [13] DING L, Bi Y, SUN D, *et al.* Efficient scheduling with random network coding in multi-relay wireless network[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2014, 19(1): 59-64. doi: 10.1007/s12204-014-1475-9.
  - [14] ASLAM M A and HASSAN S A. Analysis of multi-source multi-hop cooperative networks employing network coding [C]. IEEE 81st Vehicular Technology Conference, Glasgow, United Kingdom, 2015: 1-5. doi: 10.1109/VTCSpring.2015.7145700.
  - [15] HO T, MEDARD M, KOETTER R, *et al.* A random linear network coding approach to multicast[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(10): 4413-4430. doi: 10.1109/TIT.2006.881746.
- 王 练: 女, 1976 年生, 博士生, 副教授, 研究方向为网络编码、无线网络安全。  
梁申虎: 男, 1988 年生, 硕士生, 研究方向为网络编码。