

中继协作无线网络中不完美反馈下 基于网络编码的重传方案

王 练,任治豪,何 利,张勋杨,张 贺,张 昭

(重庆邮电大学计算机科学与技术学院,重庆 400065)

摘 要: 无线广播网络传输过程中,目的节点反馈信息丢失或部分丢失导致发送节点不能了解目的节点的真实接收状态.为提高不完美反馈下无线网络的重传效率,本文提出中继协作无线网络中不完美反馈下基于网络编码的重传方案.本方案基于部分可观察马尔科夫决策过程对不完美反馈下的重传过程进行建模.发送节点根据系统观测状态和最大置信度更新系统估计状态,根据数据包发送顺序,优先选择最早丢失且能够恢复最多丢包的编码包重传.目的节点缓存不可解编码包以提升编解码机会.重传过程中源节点关注目的节点请求包需求,相同情况优先选择传输可靠性较高的中继节点,以提升传输有效性.仿真结果表明,在不完美反馈下相对于传统方案,本方案可有效提高重传效率.

关键词: 不完美反馈;重传;网络编码

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2019)04-0818-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.04.008

Retransmission Scheme Based on Network Coding for Relay-Assisted Wireless Network with Imperfect Feedback

WANG Lian, REN Zhi-hao, HE Li, ZHANG Xun-yang, ZHANG He, ZHANG Zhao

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

Abstract: During wireless network transmission, when the feedback information from the destinations is lost or partially lost, the source cannot achieve the real accepting status of destinations. To improve the retransmission efficiency of wireless networks with imperfect feedback, a retransmission scheme based on network coding is proposed. The retransmission procedure with imperfect feedback is modeled based on POMDP (Partially Observable Markov Decision Process) theory. According to the system observation status and the maximum confidence degree, the source updates the system estimation status. And the source gives preference to select the encoding packet that can recover the earliest lost packet and the most lost packets according to the packet sending sequence. To increase the coding and the decoding opportunities the destination can buffer the encoding packets that cannot be decoded. During retransmission procedure the source focuses on the destination requirements. In the same conditions the relay with higher transmission reliability is preferentially selected to improve the transmission efficiency. Simulation results show that the scheme proposed can effectively improve the retransmission efficiency compared with the traditional retransmission scheme with imperfect feedback in wireless multicast network.

Key words: imperfect feedback; retransmission; network coding

1 引言

无线传输媒介的特殊性,传输信道间的互干扰以及多径衰落等,导致无线传输具有较高丢包率,提升重

传有效性已成为提高无线传输有效性的关键问题之一.2000年,Ahlsvede等人^[1]基于网络信息流提出网络编码(Network Coding, NC)的基本思想,并证明其可使网络多播信息流逼近网络传输容量理论的上界.随着

收稿日期:2017-09-05;修回日期:2019-01-07;责任编辑:李勇锋

基金项目:国家自然科学基金(No. 61602073);重庆市教委科学技术研究(No. KJ1704103, No. KJ1600445);重庆市基础科学和前沿技术研究(No. cstc2017jcyjA0818)

网络编码理论进一步完善,网络编码被广泛应用于提高网络吞吐量与传输可靠性等. Katti 等人^[2]进一步提出机会式网络编码 (Opportunistic Network Coding, ONC), ONC 编解码运算简单,通过单次重传编码包能恢复多目的节点丢失的数据包,减少无线多播重传次数.

完美反馈下,文献[3~5]对于不能解码的编码包直接丢弃,重传有效性受限.文献[6]在单跳广播网络模型下通过哈希搜索和基于网络编码的重传进行编码包选择,重新传输最优组合或原始丢失数据包的最大组合,提高每一次传输的效率.文献[7,8]皆提出了基于缓存的网络编码重传机制.文献[7]中接收端可缓存暂时不能解码的编码包,该策略要求前项编码包被正确接收,且当数据包较多时缓存开销大.文献[8]在编码时主动避免不能解码的编码包生成.文献[9]根据目的节点需求的时延要求动态管理缓存队列,根据网络链路状态判断是否进行基于网络编码的传输.中继协作传输被引入无线网络,可增大传输距离,保证传输效率^[10].文献[11]基于最大权重团策略,提出一种基于立即可解网络编码的传输方案.文献[12]提出一种基于权重的包选择调度传输方案,以最小化完成时延为目标,编码包需满足在中继节点与目的节点同时解码,增加了编码限制条件.

假设无线网络重传为完美反馈,与实际无线网络传输环境不符.文献[13]在单跳网络环境下,证明反馈信息的丢失对基于网络编码的重传方案性能有一定的影响,并指出随着丢包概率的增加,当目的节点未接收到反馈信息,目的节点丢失该数据包的概率总大于接收到该数据包的概率.在单跳无线多播网络不完美反馈情况下,文献[14]首先确定在不确定接收状态下数据包的不同可能状态的概率,根据广义立即可解网络编码 (Generalized Instantly Decodable Network Coding, GIDNC) 图模型,通过最大权重团搜索的启发式算法选择编码包传输,以减少丢失数据包的重传次数.文献[15]通过改进 GIDNC 图模型提出了丢失广义立即可解网络编码 (Lossy GIDNC, LGIDNC) 图模型,通过最大权重团算法,当反馈丢包率高于传输丢包率时,能有效减小解码延时.文献[16]通过 GIDNC 图模型,使用次优贪心算法选择编码包进行传输,以减少丢包的重传次数.文献[17]采用极大似然估计 (Maximum Likelihood, ML),在每次重传前,首先根据 ML 方法选择一个可能性最大的数据包接收状态,在此状态下使用最大权重团划分算法计算最优编码方案.但随着无线通信规模的发展,更多的无线应用场景都需要在中继协作网络环境中进行,而针对不完美反馈下中继协作网络传输的相关研究较少.

针对不完美反馈下中继协作无线网络重传调度问题,在现有的研究基础上,本文提出基于网络编码的不完美反馈重传方案 (Retransmission Scheme Based on Network Coding with Imperfect Feedback, NCIF) 和不完美反馈下基于网络编码的全丢失重传方案 (Completely Lost Retransmission Scheme Based on Network Coding with Imperfect Feedback, CLIF). NCIF 方案在丢包恢复阶段,发送节点首先根据目的节点的反馈信息,基于部分可观察马尔科夫决策 (Partial Observable MDP, POMDP) 理论,计算当前观察状态下系统可能状态的置信度,选择置信度最大的状态作为系统估计状态,根据系统估计状态,源节点和中继节点通过基于缓存的数据包调度策略 (Cache-based Packets Scheduling, CBPS) 协作恢复目的节点丢失数据包.通过估计目的节点的真实接收状态,减少因反馈丢失造成重复编码的影响.目的节点缓存不可解编码包,一定程度可增加编解码机会.重传过程相同情况下,优先选择传输可靠性更好的中继节点重传,从而提高重传效率.

2 网络模型及相关定义

2.1 网络模型

无线网络包括一个源节点 S , 一个中继节点 R 和 M ($M \geq 2$) 个目的节点 $\mathbf{D} = \{D_1, D_2, \dots, D_M\}$, 如图 1 所示. 源节点 S 根据目的节点的请求, 将 N 个数据包 $\mathbf{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$ 在中继节点 R 的协助下发送给 M 个目的节点, 每一个目的节点接收全部的 M 个数据包. 图 1 所示, 实线箭头表示无线数据传输信道, 信道为删除信道, $p_{s,i}$, $p_{r,i}$ 和 $p_{s,r}$ 分别表示源节点 S 到目的节点 D_i 、中继节点 R 到目的节点 D_i 、源节点 S 到中继节点 R 的信道丢包率, 且服从伯努利分布并满足 $p_{s,i} > p_{r,i}$, $p_{s,i} > p_{s,r}$.

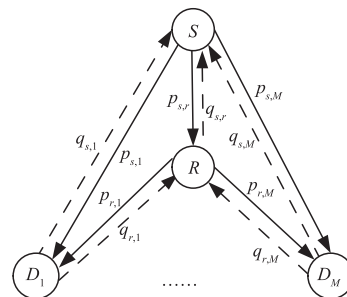


图1 网络模型

初始传输阶段,源节点 S 通过有损信道向 M 个目的节点传输 \mathbf{P} 中的 N 个原始数据包,每一个目的节点侦听发送节点发送的全部数据包.在丢包恢复阶段,发送节点根据不同目的节点的丢包情况,采用异或运算编码生成重传包.重复恢复过程直到所有目的节点接收到全部的数据包.在初始传输阶段和丢包恢复阶段,

每个目的节点反馈 ACK/NACK 至发送节点. 图 1 虚线箭头表示无线反馈信道, 信道为删除信道, 即反馈信道不可靠, $q_{i,s}$, $q_{i,r}$ 和 $q_{r,s}$ 分别为对应反馈信道丢包率, 且服从伯努利分布. 如果发送节点未接收到目的节点的反馈信息, 则反馈信息丢失.

2.2 相关定义

定义 1 丢包分布矩阵 M_{PDM} 发送节点根据信宿节点的反馈信息建立或更新的数据包接收状况矩阵. M_{PDM} 是 M 行 N 列矩阵, M 表示目的节点个数, N 表示数据包个数, 矩阵元素 p_{ij} ($1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$) 表示数据包 P_j 在目的节点 D_i 的接收状态, $p_{ij} = 0$ 表示 D_i 收到数据包 P_j , $p_{ij} = 1$ 表示 D_i 丢失数据包 P_j , $p_{ij} = x$ 表示因反馈信息丢失, 数据包 P_j 在目的节点 D_i 的状态不明确. 对目的节点 D_i , 用接收向量 $\alpha_i = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$ 保存数据包接收情况, 如果已成功接收 P_j , 则 $\alpha_j = 0$, 否则 $\alpha_j = 1$.

定义 2 编码集合 C 记录当前哪些数据包已加入编码集合, 初始化 $C = \emptyset$, 不限制 C 的大小, 直到不满足具体的编码条件为止, 发送节点根据编码集合进行编码构成编码包 P_{EP} . 每一个编码包, 有编码向量 $\beta_i = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N)$ 表示编码信息, 如果数据包 P_j 参与编码, 则 $\beta_j = 1$, 否则 $\beta_j = 0$.

定义 3 可解编码包原则 如果两个丢包在任何目的节点都不同时丢失, 则这两个数据包满足可解编码包原则. 对于 n ($n \geq 2$) 个数据包, 只有当任意两个丢包满足可解编码包原则时, 该 n ($n \geq 2$) 个数据包才满足可解编码包原则. 假设编码包 P_{EP} 对应的编码向量 β_i , 对目的节点 D_i , 则有

$$\sum (\alpha_i \& \beta_i) = \sum \beta_i - 1 \quad (1)$$

式中, $\alpha_i \& \beta_i$ 表示两向量元素进行与运算, $\sum \beta_i$ 表示对向量元素求和, 下同. 如果目的节点接收到该类编码包, 则解码 P_{EP} .

定义 4 不完美反馈 指发送节点向目的节点发送数据包 (原始数据包或编码包) 之后, 目的节点 D_i 向发送节点发送 ACK/NACK 反馈数据包的接收情况. 反馈过程中, 目的节点 D_i 的反馈信息丢失的概率为 q_i ($1 \leq i \leq M$), 如果反馈信息丢失, 则发送节点不能正确获得目的节点的真实接收状态, 此时称为不完美反馈; 如果发送节点接收到全部目的节点的反馈信息, 发送节点获得所有目的节点的真实接收状态, 称为完美反馈.

3 不完美反馈重传方案

通过部分可观察马尔科夫决策 (Partial Observable MDP, POMDP) 理论, 对不完美反馈重传过程进行分析与建模, 采用置信状态来估计系统接收状态, 提高重传

效率. 针对不完美反馈下的重传, 本文提出两种重传方案: 不完美反馈下基于网络编码重传方案和不完美反馈下基于网络编码的全丢失重传方案. 两种方案对反馈信息丢失的处理方式不同, 前者采用置信状态估计目的节点的真实接收状态, 然后将置信度最大的置信状态作为系统估计状态, 根据 CBPS 包调度策略生成编码包, 发送节点重传对应编码包. 后者将反馈信息已丢失的目的节点接收状态置为丢失, 即如果发送节点没有接收到目的节点的反馈则视为发送数据包丢失, 然后更新数据包接收状态矩阵, 根据 CBPS 包调度策略生成编码包, 发送节点重传对应编码包, 直到所有目的节点接收到所有的数据包.

3.1 POMDP 系统建模

为减少资源浪费, 提高重传效率, 本文采用 POMDP 理论根据观测状态和置信状态来估计目的节点的真实接收状态. 采用 POMDP 模型描述不完美反馈下丢包恢复阶段的系统状态估计算法, 相应的模型参数如下所述.

系统状态集 $\mathbf{S} = \{s_1, s_2, \dots\}$: \mathbf{S} 中各元素表示目的节点 D 的数据包的接收状态. 行动集 $\mathbf{A} = \{a_1, a_2, \dots\}$: \mathbf{A} 中各元素代表不同的编码包.

系统状态转移概率 $T(s, a, s')$:

$$T(s, a, s') = \prod_i^M \tau_i(s_i, a, s'_i) \quad (2)$$

其中, $\tau_i(s_i, a, s'_i)$ 表示从当前状态 s_i 下, 传输编码包 a 后, 目的节点 D_i 的数据包接收状态转移到 s'_i 的概率, $\tau_i(s_i, a, s'_i) = \Pr(s'_i | s_i, a)$. 当发送节点发送编码包 a 后, 目的节点的数据包接收状态可能有以下四种情况: (a) 目的节点没有接收到该编码包; (b) 目的节点接收到编码包且目的节点无编码包所包含的全部原始数据包; (c) 目的节点已有编码包所包含的原始数据包; (d) 其它. 因此, $\tau_i(s_i, a, s'_i)$ 表示为:

$$\tau_i(s_i, a, s'_i) = \Pr(s'_i | s_i, a) = \begin{cases} p_i & (a) \\ 1 - p_i & (b) \\ 1 & (c) \\ 0 & (d) \end{cases} \quad (3)$$

观测状态集 $\mathbf{Z} = \{z_1, z_2, \dots\}$: \mathbf{Z} 中各元素表示发送节点通过反馈信息获得的目的节点原始数据包的接收状态. 由于反馈信道不可靠, 根据反馈信息获得的观测状态不一定是当前时刻目的节点数据包的真正接收状态, 则系统观测状态矩阵 $\text{ObsPDM} = \{z_1; z_2; \dots\}$.

系统观测状态概率 $O(a, s', z)$:

$$O(a, s', z) = \prod_i^M o_i(a, s'_i, z_i) \quad (4)$$

其中, $o_i(a, s'_i, z_i)$ 表示经过传输编码包 a 后, 目的节点 D_i 进入一个新的状态时发送节点根据反馈信息观测到的

目的节点的状态 z_i 时的概率, $o(a, s'_i, z_i) = \Pr(z_i | s'_i, a)$. 当发送节点观测到系统的状态为 z_i 时, 系统的状态不一定是 s'_i , 则观测状态有四种情况: (a) 目的节点向发送节点反馈的信息丢失; (b) 目的节点向发送节点反馈的信息接收到; (c) 目的节点已有编码包所包含的原始数据包, 不管反馈信息是否丢失, 目的节点不需要该编码包; (d) 其它. 因此, $o_i(a, s'_i, z_i)$ 表示为:

$$o_i(a, s'_i, z_i) = \Pr(z_i | s'_i, a) = \begin{cases} q_i & (a) \\ 1 - q_i & (b) \\ 1 & (c) \\ 0 & (d) \end{cases} \quad (5)$$

系统回报函数 $R(z, s', s, a)$:

$$R(z, s', s, a) = \sum_{i=1}^M f(o_i, s_i, a, D_i) \quad (6)$$

表示发送节点发送编码包 a 后, 所有目的节点恢复的丢失原始数据包个数. 其中, $f(o_i, s_i, a, D_i)$ 表示在状态 s 下, 发送编码包 a , 目的节点转移到状态 s' 后, 发送节点根据反馈信息, 观测到状态 z 时, 目的节点 D_i 恢复的原始数据包的个数.

基于上述 POMDP 模型, 使用置信状态置信度 b , 根据无线传输信道丢包率 p 、反馈信道丢包率 q 和已知的反馈信息估计目的节点的真实丢包状态.

系统置信状态置信度 b :

$$b(s') = \frac{O(a, s', z) \sum_{s \in S} T(s, a, s') b(s)}{\Pr(z | b, a)} \quad (7)$$

其中, $\Pr(z | b, a) = \sum_{s \in S} b(s) \sum_{s' \in S} T(s, a, s') O(a, s', z)$, $b(s)$ 表示上一时隙的置信度.

3.2 基于网络编码的不完美反馈重传方案 (NCIF)

基于 POMDP 理论对不完美反馈系统建模, 本方案首先根据发送节点接收到的目的节点的反馈信息更新系统的观测状态, 发送节点根据系统的观测状态和上一时隙发送的编码包, 计算系统的可能状态和最大置信状态, 根据最大置信状态更新系统估计状态. 然后发送节点根据系统估计状态和 CBPS 包调度策略生成编码包, 发送节点重传编码包, 直到所有目的节点接收到所有的请求数据包.

3.2.1 系统状态更新算法

发送节点收到目的节点的 ACK/NACK 后, 更新系统观测状态, 然后根据系统观测状态和上一时隙发送的编码包, 计算系统可能状态置信度, 选择置信度最大的可能状态作为系统估计状态. 当发送节点收到所有的目的节点的应答信息 ACK/NACK 或超过反馈时限 (即反馈信息丢失) 时, 发送节点根据已经获得的 ACK/NACK, 更新系统观测状态和系统估计状态, 算法伪代码如算法 1 所示.

算法 1 系统状态更新算法

输入: b, ObsPDM, C // b : 上一时隙置信度
 // ObsPDM : 系统观测状态矩阵
 // C : 上一时隙发送的编码包对应的编码集合
 输出: b, EstPDM
 // b : 更新后的置信度, EstPDM : 系统估计状态矩阵

Algorithm:
 if 发送节点接收到 M 个 ACK/NACK
 $b \leftarrow 1$; // 将置信状态置信度置为 1
 EstPDM = ObsPDM;
 else
 for $i = 1 : M$
 if 发送节点接收到目的节点的 D_i 反馈
 更新系统估计状态 **EstPDM**;
 else
 由式(7)计算系统可能状态置信度 b_i ; // 根据系统观测
 // 状态 ObsPDM 和上一时隙发送编码包 C
 $b = \max(b_i)$;
 根据更新后的最大置信度对应的置信状态
 更新系统估计状态 **EstPDM**;
 endif
 endfor
 endif

3.2.2 基于缓存的数据包调度策略

发送节点根据系统估计状态 EstPDM , 按照原始数据包传输顺序, 优先选择最先丢失的原数据包加入编码集合. 其次从数据包之间的可解编码包原则出发, 继续向编码集合中添加数据包, 直至不存在可加入编码集合的原始数据包为止, 组合成可解编码包, 不限制加入编码集合中的原始数据包个数; 如果不能找到可解编码包, 则按照数据包发送顺序, 优先选择最先丢失的原始数据包和有丢失的数据包加入编码集合, 组合成允许在部分目的节点不可解码编码包. 最后, 发送节点重传编码包, 目的节点对编码包进行解码恢复丢包、缓存不可解编码包或丢弃不需要的编码包. 算法伪代码如算法 2 所示. 基于 POMDP 系统建模、系统状态更新算法和编码包选择算法, NCIF 方案流程如图 2 所示.

算法 2 CBPS 编码包选择算法

输入: $M, N, \text{EstPDM}, \text{buffer}$
 // M : 目的节点个数, N : 原始数据包个数
 // EstPDM : 系统估计状态, buffer : 缓冲区
 输出: C, buffer // C : 编码包对应的编码集合,
 // buffer : 更新后的缓冲区

Algorithm:
 $C = \emptyset$;
 $\mathbf{B} = \text{zeros}(1, M)$; // 记录目的节点未丢失数据包
 for $i = 1 : N$

```

if 数据包  $P_i$  在所有目的节点都没有丢失
     $\mathbf{B}(i) = 0$ ; //表示该列不参与编码
endif
endfor
if isempty( buffer ) //如果缓冲区为空
    for  $i = 1 : N$ 
        if  $\mathbf{B}(i) = 1$ 
             $C \leftarrow P_i$ ; //将第一个在目的节点有丢失
            //的数据包加入编码集合
            for  $j = i + 1 : N$ 
                if  $\mathbf{B}(i) = 1$  &&  $P_j$  加入  $C$  后满足可解编码包原则
                     $C \leftarrow P_j$ ; //将  $P_j$  数据包加入编码集合
                endif
            endfor
            if 没有找到可解编码包
                for  $j = i + 1 : N$ 
                    if  $\mathbf{B}(j) = 1$ 
                         $C \leftarrow P_j$ ;
                        buffer  $\leftarrow C$ ; //复制到缓冲区
                        break;
                    endif
                endfor
            endif
        endif
    endfor
else //缓冲区不为空
     $C \leftarrow \text{buffer}(C(2))$ ; //将缓冲区编码集合的第二个
    //数据包加入编码集合
    for  $j = C(2) + 1 : N$ 
        if  $\mathbf{B}(i) = 1$  &&  $P_j$  加入  $C$  后满足可解编码包原则
             $C \leftarrow P_j$ ; //将  $P_j$  数据包加入编码集合
        endif
    endfor
endif
endif

```

3.3 不完美反馈下基于网络编码的全丢失重传方案 (CLIF)

在不完美反馈下,本方案将传统的处理方式与网络编码技术相结合,如果发送节点未接收到目的节点的反馈,则将反馈信息丢失的目的节点接收状态置为丢失状态。

4 理论分析

4.1 时间复杂度分析

NCIF 方案首先判断所有目的节点是否接收到所有的数据包,时间复杂度为 $O(MN)$;如果没有接收到全部的数据包,判断是否接收到全部的反馈信息,时间复杂度为 $O(M)$;接下来采用置信度估计系统的接收状态,时间复杂度为 $O(|S|^2 \cdot |Z| \cdot |A|)$,在一次传输结束后,发送节点只能观测到一种状态,因此 $|Z| = 1$,在确定的系统状态下,发送节点只会选择一个编码包进行



图2 NCIF方案流程图

发送,则 $|A| = 1$,系统可能状态只与丢失反馈信息的个数相关,而反馈信息丢失最大个数为 M . 因此,估计系统的接收状态的时间复杂度为 $O(M^2)$;在编码包生成阶段,根据 $M \times N$ 丢包分布矩阵确定两两丢包之间的可编码性,通过两两之间的可编码性确定编码包,目的节点丢包数最多为 N ,因此编码包生成的时间复杂度为 $O(MN^2)$,在选择由源节点或是中继节点发送编码包时,只需用遍历中继的丢包分布矩阵,其维度为 $1 \times N$,因此,编码包生成与选择的时间复杂度为 $O(MN^2)$. 综上所述,系统的整体时间复杂度为 $O(MN^2)$.

4.2 数据包平均传输次数分析

在重传可靠的情况下,基于 ONC 重传机制的重传次数 N_{num} 的理论上下界为 $L_{\text{max}} \leq N_{\text{num}} \leq |L|$,其中 L_{max} 表

示有丢失数据包目的节点的最大丢包个数, $|L|$ 表示在初始传输阶段结束后, 所有目的节点丢失的不同数据包的个数. 若原始数据包的个数为 N , 则在重传可靠的情况下, 数据包的平均传输次数为:

$$\overline{N_{\text{num}}} = \frac{N + N_{\text{num}}}{N} = 1 + \frac{N_{\text{num}}}{N} \quad (8)$$

进一步可知, 当重传可靠时, $\overline{N_{\text{num}}}$ 的理论上下界为:

$$1 + \frac{L_{\text{max}L}}{N} \leq \overline{N_{\text{num}}} \leq 1 + \frac{|L|}{N} \quad (9)$$

由式(9)可知下界由 $L_{\text{max}L}$ 决定, $L_{\text{max}L} = N \cdot \max_{i \in \{1, 2, \dots, M\}} \{p_i\}$, p_i 表示发送节点到目的节点的丢包概率, 则有 $1 + \max_{i \in \{1, 2, \dots, M\}} \{p_i\} \leq \overline{N_{\text{num}}} \leq 1 + \frac{|L|}{N}$. 重传可靠是一种理想状态, 在实际环境中, 因为各种干扰因素的存在, 使得重传不可靠(即数据包重传有可能丢失), 并且, 数据包的丢失是随机的, 因此重传不可靠时上界大于等于重传可靠理论上界 $1 + \frac{|L|}{N}$.

5 仿真结果与分析

在不完美反馈下, 将 NCIF 方案与 CLIF 方案进行对比. 同时为了说明反馈信息对网络编码性能的影响, 将完美反馈作为参考. 在完美反馈下, 在每次传输反馈时, 发送节点接收到全部目的节点的反馈信息, 即 $q_{i,s} = 0$, $q_{i,r} = 0$, $q_{r,s} = 0$. 此时, 发送节点了解目的节点的真实接收状态, 即 **EstPDM = ObsPDM**, 实验中将完美反馈下的方案记为 MBNC. 将完美反馈方案 MBNC 和文献[12]所提方案 SR-WPS 方案进行对比, 同时将不完美反馈重传方案 NCIF 和 CLIF 中对反馈信息丢失的处理方案拓展到 SR-WPS 方案中, 分别用 SR-WPSIF 和 SR-WPSCL 表示. 为了避免数据偶然性差异, 本实验结果基于多次实验求平均值得出最终实验结果.

数据包平均传输次数随目的节点个数 M 变化的情况, 如图 3 所示. 目的节点个数 M 从 2 增加到 12, 每次递增 2. 系统参数分别设置为原始数据包个数 $N = 50$, 传输链路丢包率 $p_{s,i} = 0.3$, $p_{r,i} = 0.1$, $p_{s,r} = 0.2$, 反馈链路丢包率 $q_{i,s} = 0.25$, $q_{i,r} = 0.05$, $q_{r,s} = 0.15$. 仿真结果表明: 随着目的节点个数 M 的增加, 数据包平均传输次数都有所增加, M 增加会导致同一数据包在更多的目的节点丢失, 数据包的丢失分布更加密集, 编码机会减少. 其它条件不变的情况下, 中继节点接收的数据包个数相对稳定, 需要源节点 S 重传的数据包个数增加, 但 S 到目的节点的传输成功率相对于 R 到目的节点的成功率要低, 故性能也有所下降.

不完美反馈下, NCIF 方案的性能优于 CLIF 且优于 SR-WPSIF 和 SR-WPSCL, 但低于完美反馈 MBNC 方案

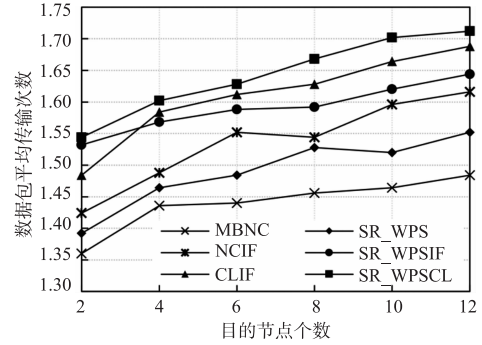


图3 数据包平均传输次数随M的变化

和 SR-WPS 方案, 因为反馈信息的丢失对编码机会产生影响, 从而进一步影响性能. 而 CLIF 和 SR-WPSCL 性能低于采用置信状态进行估计的方案, CLIF 方案中发送节点直接将没有接收到反馈的编码包处理为丢失, 发送节点不能了解真实的接收状态, 选取的编码包不合理, 这对系统效率造成一定的影响. NCIF 方案采用置信度对系统可能的状态进行估计, 可以减少 CLIF 方案因选取不合理编码包对系统效率造成的影响, 但并不是每次通过计算置信度就能准确地估计出系统的真实状态, 因此与完美反馈相比性能要差, 但相比较 CLIF 方案, NCIF 方案的重传效率有一定的提高.

随数据包个数 N 的变化数据包平均传输次数的情况, 如图 4 所示. 原始数据包个数 N 从 10 增加到 50, 每次递增 10. 系统参数分别设置为目的节点个数 $M = 8$, 传输链路丢包率 $p_{s,i} = 0.3$, $p_{r,i} = 0.1$, $p_{s,r} = 0.2$, 反馈链路丢包率 $q_{i,s} = 0.25$, $q_{i,r} = 0.05$, $q_{r,s} = 0.15$. 仿真结果表明数据包平均传输次数在其它条件不变的情况下, 几个方案的性能都随着原始数据包个数 N 的增加而降低, 因随着原始数据包个数的增加, 发送节点的编码机会增加, 从而一次传输的编码包可以恢复更多的目的节点的丢失数据包, 因此数据包平均传输次数有所下降. 最终趋于平稳, 因随着原始数据包个数的增加, 发送一次编码包最多可以恢复 M 个原始数据包. NCIF 方案优于 CLIF 方案, 因采用置信度估计的方案可降低因发送节点未接收到目的节点的反馈信息所造成的影响. NCIF 方案和 MBNC 方案分别优于 SR-WPSIF 方案和 SR-WPS 方案, 因 MBNC 方案中通过 S 生成编码包时不考虑中继节点 R 的解码性, 以最大效率恢复目的节点丢失数据包, 而 SR-WPS 方案中通过 S 生成编码包的过程考虑了每个编码包在 R 处必须可解码, 增加了编码限制条件, 导致编码机会减少, 重传效率受到影响.

数据包平均传输次数随源节点 S 到中继节点 R 的丢包概率 $p_{s,r}$ 变化的情况, 如图 5 所示. 系统参数分别设置为目的节点个数 $M = 8$, 原始数据包个数 $N = 30$, 传输链路丢包率 $p_{s,i} = 0.4$, $p_{r,i} = 0.2$, $q_{i,s} = 0.3$, 反馈链路丢

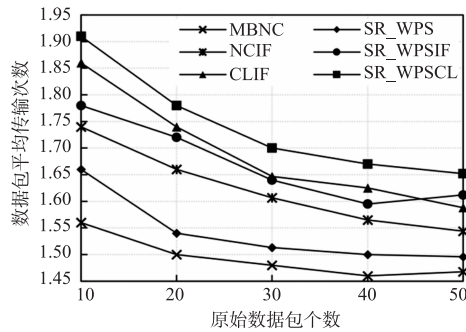
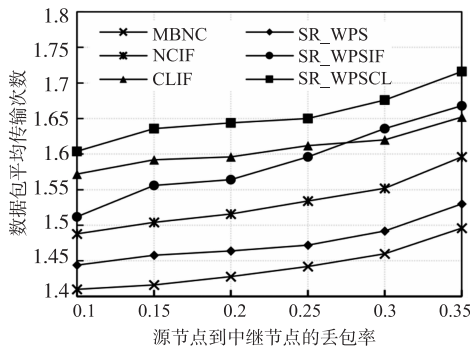


图4 数据包平均传输次数随N的变化

包率 $q_{i,r} = 0.15$, $q_{r,s} = 0.15$. 仿真结果表明随着 $p_{s,r}$ 的增加, NCIF 方案和 CLIF 方案的性能都有所下降, 因随着 $p_{s,r}$ 的增加, 初始传输阶段中继节点 R 接收到的数据包的个数不断减少, 从而导致 R 的作用减小, 需要通过 S 重传恢复的数据包增加, 但 S 到目的节点传输成功率低于 R 到目的节点的传输成功率, 因而数据包重传次数增加, 重传效率下降.

图5 数据包平均传输次数随丢包率 $p_{s,r}$ 的变化

6 结论

本文通过对不完美反馈下中继协作无线网络传输特点的分析与研究, 提出不完美反馈下基于网络编码的重传方案. 基于 POMDP 对传输过程进行建模, 发送节点对未接收到反馈信息的目的节点状态采用置信状态进行估计, 可以降低传统方案对反馈信息的依赖性, 提高发送节点的编码准确性. 目的节点缓存不可解编码包, 发送节点利用不可解编码包可提高编解码机会. 选择编码包时不要求在中继节点和目的节点同时可解, 减少了对源节点的编码限制, 进一步增加编解码机会. 在转发链路状态不同的情况下, 优先选择传输可靠性较高的中继节点进行转发, 从而提高传输可靠性. 仿真结果表明, 本文所提方案相比较于传统方案, 能有效提高编解码效率, 减少丢包重传次数.

参考文献

[1] AHLSSWEDE R, CAI N, LI S Y R, et al. Network informa-

tion flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204 - 1216.

- [2] KATTI S, RAHUL H, HU W J, et al. XORs in the air: practical wireless network coding [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006, 36(4): 243 - 254.
- [3] 肖巍, 梅中辉. 一种改进的即时解码网络编码的无线重传策略 [J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(3): 144 - 148.
- XIAO W, MEI Z H. An improved wireless retransmission strategy based on instantly decodable network coding [J]. Computer Technology and Development, 2016, 26(3): 144 - 148. (in Chinese)
- [4] 孟利民, 单剑辉. 基于机会式网络编码改进的加权广播重传方法 [J]. 浙江工业大学学报, 2017, 45(6): 621 - 627.
- MENG L M, SHAN J H. An improved weighted broadcasting retransmission method based on opportunistic network coding in wireless networks [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2017, 45(6): 621 - 627. (in Chinese)
- [5] 李彬, 李泉, 张若南, 等. 无线组播网络中应用网络编码的动态组合重传算法 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(12): 38 - 44.
- LI B, LI Q, ZHANG R N, et al. A retransmission algorithm with dynamic linear combination based on network coding in wireless multicast networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(12): 38 - 44. (in Chinese)
- [6] Shao P, Zhao Y, Yang M, et al. Hash searching and network coding based constant retransmission for wireless multicast [J]. IET Communications, 2017, 11(2): 302 - 309.
- [7] QURESHI J, FOH C H, CAI J F. Online XOR packet coding: Efficient single-hop wireless multicasting with low decoding delay [J]. Computer Communications, 2014, 39: 65 - 77.
- [8] 姚玉坤, 陈曦, 任智, 等. 基于冗余避免的高效网络编码广播重传方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(5): 1170 - 1176.
- YAO Y K, Chen X, Ren Z, et al. Efficient network coding broadcasting retransmission approach based on redundancy avoiding [J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(5): 1170 - 1176. (in Chinese)
- [9] 李方敏, 杨璐, 刘新华. 基于缓存管理和链路状态的网络编码中继传输算法 [J]. 通信学报, 2017, 38(3): 1 - 6.
- LI F M, YANG L, LIU X H. Network coding relay transmission algorithm based on cache management and link status [J]. Journal on Communications, 2017, 38(3): 1 - 6. (in Chinese)
- [10] ZHAO B, VALENTI M C. Practical relay networks: a generalization of hybrid-ARQ [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(1): 7 - 18.
- [11] ELMAHDY A M, SOROUR S, SEDDIK K G. General-

- ized instantly decodable network coding for relay-assisted networks [A]. The IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) [C]. US:IEEE,2014. 1759 – 1763.
- [12] GOU L,ZHANG G X,BIAN Z G,et al. Minimizing completion time for relay-assisted multicast with instantly decodable network coding [J]. IEEE Communication Letters,2016,20(3):434 – 437.
- [13] SOROUR S,VALAEE S. Effect of feedback loss on instantly decodable network coding [A]. The 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference[C]. Istanbul:IEEE,2011. 21 – 28.
- [14] DOUIK A,SOROUR S,ALOUINI M. Delay reduction in lossy intermittent feedback for generalized instantly decodable network coding [A]. IEEE 9th International Conference on Wireless and Mobile Computing,Networking and Communications[C]. Lyon:IEEE,2013. 388 – 393.
- [15] DOUIK A,SOROUR S,Al-NAFFOURI T Y, et al. A lossy graph model for delay reduction in generalized instantly decodable network coding [J]. IEEE Wireless Communications Letters,2014,3(3):281 – 284.
- [16] DOUIK A,SOROUR S,NAFFOURI T Y Al, et al. Delay reduction for instantly decodable network coding in persistent channels with feedback imperfections [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2015,14(11): 5956 – 5970.
- [17] SOROUR S,DOUIK A,VALAEE S. Partially blind instantly decodable network codes for lossy feedback environment[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2014,13(9):4871 – 4883.

作者简介



王 练 女,1976 年生于贵州遵义. 博士.
研究方向为网络编码、安全网络编码.
E-mail:wanglian@cqupt.edu.cn



任志豪 男,1992 年生于陕西西安. 硕士研究生,研究方向为网络编码.