



多播网络中基于机会网络编码改进的重传方法

邵鹏飞^{1,3}, 赵燕伟², 吴耀辉³, 姚信威¹

(1. 浙江工业大学计算机科学技术学院 杭州 310023;

2. 浙江工业大学机械工程学院 杭州 310023; 3. 浙江万里学院电子信息学院 宁波 315100)

摘要: 针对高链路分组丢失率下 HLAR(hash lookup assisted retransmission)等重传方法存在的编码率低、算法性能下降等缺陷,提出了一种改进的基于机会网络编码的广播重传方法。该方法根据接收节点反馈的丢失分组情况,不仅能够通过散列查找快速选择丢失分组组合进行编码重传,并优先重传能让最多接收节点恢复其丢失分组的单个重传分组,而且基于邻域关联充分挖掘编码机会,允许节点从多个重传分组中恢复丢失分组,从而在保持较低算法复杂度的情况下,有效地提高重传性能。仿真结果表明,相对于已有算法,该方法能有效减少重传次数,提高传输效率。

关键词: 无线多播;网络编码;机会网络编码;重传;优化方案

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015089

An Improved Retransmission Approach Based on Opportunistic Network Coding in Multicast Networks

Shao Pengfei^{1,3}, Zhao Yanwei², Wu Yaohui³, Yao Xinwei¹

(1. College of Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

3. School of Electronic and Information Engineering, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, China)

Abstract: A novel opportunistic-network-coding-based retransmission approach was proposed. According to the feedback on packet loss from the receiving nodes, this novel approach can not only efficiently select a combination of lost packets through Hash lookup for packet retransmission, but also can ensure priority retransmission making up to a single combination retransmission packet which can maximize the number of receiving nodes for recovering their lost packets. Furthermore, the proposed approach fully exploits the coding opportunity based on neighborhood association, and allows the receiving nodes to recover their lost packets from multiple retransmission packets. The simulation results show that this novel approach can effectively reduce the number of retransmissions to improve the transmission efficiency with respect to the existing algorithms.

Key words: wireless multicast, network coding, opportunistic network coding, retransmission, optimal scheme

收稿日期:2014-12-01;修回日期:2015-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61379123),宁波市自然科学基金资助项目(No.2012A610016, No.2012A610061),宁波市社会发展基金资助项目(No.2014C50006),宁波市创新团队基金资助项目(No.2012B82006)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61379123), Ningbo Natural Science Foundation(No.2012A610016, No.2012A610061), Ningbo Social Development Foundation(No.2014C50006), Ningbo Innovation Team Foundation(No.2012B82006)

论文引用格式:邵鹏飞,赵燕伟,吴耀辉等.多播网络中基于机会网络编码改进的重传方法.电信科学,2015089

Shao P F, Zhao Y W, Wu Y H, *et al.* An improved retransmission approach based on opportunistic network coding in multicast networks. Telecommunications Science, 2015089



1 引言

多播是无线网络中最常用的数据传输方式之一。在许多无线网络应用(如视频传输、军事通信和抢险应急通信)中,都要求多播传输具有可靠性。然而,无线信道存在的多径干扰和衰落造成的分组丢失严重影响了多播传输的效率,需要设计更高效的重传方法来提高传输可靠性^[1-3]。

无线传输的广播特性,使得网络编码在提高无线传输效率方面有很好的应用^[4,5],近年来出现了很多基于网络编码进行重传设计的相关研究^[6-8]。参考文献[9]提出了将机会网络编码(opportunistic network coding, ONC)与自动重传请求(automatic repeat request, ARQ)相结合的重传策略。参考文献[10]提出了基于网络编码的广播重传(network-coding-based wireless broadcasting retransmission, NCWBR)策略,该策略虽能有效减少平均传输次数,但存在重传的编码分组在某些接收节点不可解及连续丢失分组时性能恶化等问题。参考文献[11]提出了改进的重传策略(improved network-coding-based broadcasting retransmission, INCBR),解决了不可解等问题^[9],但仍没有对丢失分组进行优化组合。参考文献[12]提出了一种采用散列组合丢失分组的重传方法 HLAR(Hash lookup assisted retransmission),能更快地组合丢失分组进行重传并有效减少平均传输次数,但在高链路分组丢失率下,算法性能明显下降,而且该方法没有考虑重传分组的再丢失问题。不同于参考文献[10~12],参考文献[13]考虑了每个节点接收链路分组丢失率的不同,提出基于机会网络编码的加权广播重传方法,将减少重传次数转化为基于加权的最大增益问题,即每次重传都能让最多的接收节点受益。上述方法虽然复杂度较低,但由于其要求生成的编码分组能被所有的节点成功解码,而且都是利用单个重传分组获取丢失分组,浪费了大量的编码机会,导致其性能不佳。参考文献[14,15]允许节点缓存解码失败的编码分组,提出了基于网络编码从多个重传分组中恢复丢失分组的方法,能有效地提高传输效率,但没对丢失分组进行优化组合,且大大增加了复杂度。

为了更好地提高重传方法的性能^[16],减少平均重传次数,并降低其实现的复杂度,在 HLAR 等方法的基础上,本文提出了改进的基于机会网络编码的重传(improved opportunistic network coding retransmission, IONCR)方法,其基本思想是在采用散列快速选择丢失分组组合进行编

码重传的基础上,扩展邻域搜索范围以进一步挖掘编码机会,并允许从多个重传分组中恢复丢失分组,在保持较低复杂度的情况下进一步提高传输效率。

2 系统模型及基于 ONC 的广播重传原理

本文采用通用无线多播模型,该模型包含一个源节点 S 和 $N(N \geq 2)$ 个接收节点 $R_i(1 \leq i \leq N)$ 。整个通信过程分为两个阶段:初始阶段和丢失分组重传阶段。

在初始阶段,源节点向接收节点逐个广播 M 个原始数据分组 $P_j(1 \leq j \leq M)$,接收节点 R_i 采用 ACK/NAK 同步反馈其丢失分组信息。假设源节点和各接收节点之间的信道是相互独立的,且反馈信道是可靠的,状态信息在反馈信道中不存在丢失^[10-12,14-15]。当 S 发送完 M 个数据分组后,能得到 N 个接收节点的接收状态信息。

在丢失分组重传阶段,源节点 S 根据反馈的状态信息选择多个丢失分组进行异或编码,再把编码生成的数据分组广播重传给多个接收节点,接收节点通过异或运算从该重传分组和已接收数据分组中恢复其丢失分组,不断重复,直到所有数据都被正确接收。

假设被选择的丢失分组为 $X_1, X_2, \dots, X_k$, 其中 $X_i(1 \leq i \leq k)$ 长度为 L , Y 表示一个编码组合分组,用二进制序列分别表示为 $[x_{i1}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{iL}]$ 和 $[y_1, \dots, y_j, \dots, y_L]$,采用 ONC 生成的广播重传分组 Y 序列的某一元素可以描述为^[12]:

$$y_j = \sum_{i=1}^k \lambda_i x_{ij} \bmod 2, \quad \lambda_i \in \{0, 1\} \quad (1)$$

其中, λ_i 表示 X_i 的编码参数。当 $\lambda_i = 1$ 时, X_i 获得参与编码的机会。

由于单个重传分组中包含多个原始丢失分组,多个接收节点可以通过解码该重传分组恢复各自的丢失分组,因此基于 ONC 的广播重传方法能有效减少重传次数。在链路损耗一定的情况下,基于 ONC 广播重传的关键在于丢失分组组合策略和编解码策略的设计,既能在保证接收节点解码的前提下增加编码机会,又能使重传次数减到最少,同时保证重要报文得到优先重传,这是一个限制条件下的最优优化问题。

IONCR 基于 ONC 广播重传,其核心思想是在保持较低算法复杂度的情况下,进一步挖掘更多的编码机会,减少平均重传次数,提高传输效率。将 IONCR 应用于实际重传过程中所需要解决的问题有:如何使重要的丢失分组首先得到重传,并保证每个重传分组能使尽可能多的接收节

点恢复其丢失分组;如何根据反馈的状态信息充分挖掘编码机会,减少重传次数;考虑所有丢失数据分组的重传问题。

3 改进的基于机会网络编码重传

定义 1 接收状态表 Θ 是指广播发送中源节点 S 通过 ACK/NAK 反馈生成的一个 $N \times M$ 大小的数据分组接收情况矩阵。接收状态表中的行表示接收节点接收情况,列表示数据分组接收情况。 $\Theta(i,j)=0$ 表示接收节点 R_i 收到数据分组 P_j , $\Theta(i,j)=1$ 表示 R_i 没有收到 P_j 。表 1 给出了一个具有 3 个接收节点和 10 个原始数据分组的 Θ 示例。

表 1 接收状态表 Θ 示例

接收节点	发送的数据分组									
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
R_1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1
R_2	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1
R_3	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0

图 1 给出了 IONCR 重传方法的实现流程。在丢失分组重传阶段,IONCR 首先更新接收状态表,据此判断所有数据分组是否被所有节点正确接收,如果是,重传结束;否则,根据接收状态表计算所有丢失分组的散列值,并生成丢失分组的散列表。为了充分挖掘编码机会,减少重传次数,并降低组合编码操作的复杂度,在搜索丢失分组组合进行编码重传时,IONCR 分两步进行:首先采用散列邻域搜索寻找符合满秩条件的丢失分组组合进行重传,然后基于邻域关联搜索寻找丢失分组组合进行编码重传。对于经

过邻域关联搜索后剩下的丢失分组或丢失分组组合(数量已经很少),IONCR 将单独发送。

3.1 生成丢失分组的散列表

接收状态表 Θ 的第 i 列表示数据分组 $P_i(1 \leq i \leq M)$ 在 N 个节点接收丢失分组的情况。为了保证当 N 个接收节点丢失 P_i 的情况不同时,对应的散列值不同,反之对应的散列值相同,IONCR 采用散列函数 h 快速计算每个丢失分组的散列值, h 表示为^[12]:

$$h_i = \sum_{j=1}^N 2^{j-1} \cdot \Theta(j,i), \quad i=1,2,\dots,M \quad (2)$$

由式(2)计算出散列值后,按散列值从大到小的顺序创建丢失分组的散列表,以散列值为列索引。表 2 给出了表 1 所示的丢失分组的散列表,其中 Nh_i 表示散列值为 h_i 的丢失分组数。当 P_i 和 P_j 的散列值相同时,它们将位于散列表中的同一列,否则位于不同列。

表 2 丢失分组的散列表

参数	值						
h_i	7	6	5	4	3	2	1
Nh_i	1	2	2	1	2	1	1
P_i	P_1	P_3	P_2	P_4	P_6	P_3	P_7
	P_8	P_9		P_{10}			

由于计算丢失分组的散列值和生成散列表是同时完成的,计算复杂度为 $O(M)$ 。

3.2 散列邻域搜索

从丢失分组的散列表中,IONCR 通过在散列邻域范围内搜索符合满秩条件的丢失分组或丢失分组组合,生成重传分组进行编码重传,当所有丢失分组都被搜索后,该步骤完成。相对于逐行逐列地扫描搜索^[10,11],邻域搜索^[12]缩小了搜索范围,提高了搜索效率。同时,IONCR 优先重传能让所有接收节点恢复其丢失分组的符合满秩条件的单个重传分组,重传效率最高,复杂度低。IONCR 不直接重传邻域搜索中发现的不符合满秩条件的可解丢失分组组合,而是将它们作为一个整体进行下一步的邻域关联搜索,进一步挖掘编码机会,实现丢失分组组合优化,从而进一步减少重传次数,提高传输效率。

定理 1 假设数据分组 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 对应的散列值分别为 $h_1, h_2, \dots, h_n$, 当满足式(3)时:

$$F_i(h_1, h_2, \dots, h_n) \leq 1, \quad i=1,2,\dots,N \quad (3)$$

由 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 异或编码组合而成的数据分组对所有

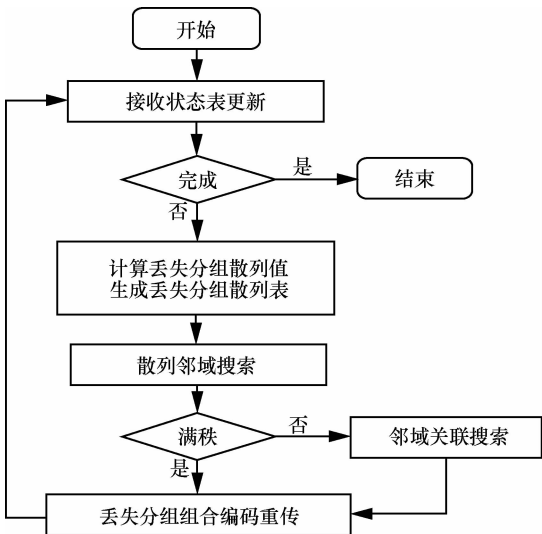


图 1 IONCR 方法流程



接收节点可解,其中 F_i 表示全部 $h_j (1 \leq j \leq n)$ 用二进制表示后其第 i 比特之和。特别地,称:

$$F_i(h_1, h_2, \dots, h_n) = 1, i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

为 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 符合异或编码组合的满秩条件,即可解条件下能从单个重传数据分组中恢复丢失分组的接收节点数达到最多。

证明 由 F_i 的定义可知,每一个 i 物理上对应的是接收节点 R_i 对 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 的接收状态,当 $F_i(h_1, h_2, \dots, h_n) \leq 1$ 时,说明 R_i 对 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 没有丢失分组或仅有一个丢失分组。考虑仅有一个丢失分组的情况,假设丢失分组为 $P_k (1 \leq k \leq n)$,则当 R_i 收到 $P_r = P_1 \oplus P_2 \oplus \dots \oplus P_k \oplus \dots \oplus P_n$ 的重传分组后,可以通过 $P_1 \oplus P_2 \oplus \dots \oplus P_{k-1} \oplus P_{k+1} \oplus \dots \oplus P_n \oplus P_r$ 恢复出 P_k 。其他节点同理,所以由 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 异或编码组合而成的重传数据分组在所有节点是可解的。

特别地,如果所有 $i (i=1, 2, \dots, N)$ 都满足 $F_i(h_1, h_2, \dots, h_n) = 1$,说明对于所有接收节点,每个节点对 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 有且仅有一个丢失分组,即所有节点都可从由 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 异或编码生成的重传分组中解码出自己的丢失分组,从而说明可解,并能够恢复丢失分组的接收节点数达到最多,证毕。

定义 2 集合 U 表示散列值 $h_1, h_2, \dots, h_n (n \in \{1, 2, \dots, M\})$ 的邻域,则 U 表示为^[12]:

$$U = \left\{ \sum_{i: F_i(h_1, h_2, \dots, h_n) = 0} 2^{i-1} \cdot \varphi_i \right\}, \varphi \in \{0, 1\}, \exists \varphi_i \neq 0 \quad (5)$$

IONCR 根据对编码性能的影响来确定数据分组的重要性。IONCR 认为,在传输中损耗率较高的数据分组,即一个数据分组被越少的接收节点接收到,则该数据分组对编码性能的影响就越大,重传中也应优先发送。因此,在丢失分组的散列表中,按散列值从大到小开始每一个丢失分组组合的搜索,直至全部丢失分组搜索完毕。

在每一个丢失分组组合搜索中,IONCR 首先选择当前最大的 h_i (h_i 对应的丢失分组存在且未被选择),再从 h_i 的邻域中选择找出满足式(3)的散列值 h_j (h_j 对应的丢失分组存在且未被选择),尔后从 h_i 和 h_j 的邻域中选择满足式(3)的散列值,依次类推,每次从已选择散列值的邻域中选择另一个散列值,直至达到满秩条件或搜索完毕。若本次搜索的结果是一组达到满秩条件的散列值,将这些散列值对应的数据分组组合成一个重传分组,否则将本次搜索到的丢失分组或丢失分组组合作为整体进行邻域关联搜索。在表2中, P_1, P_5 和 P_7, P_2 和 P_3, P_4 和 P_6 符合满秩条件,直接组合编码生成重传分组,其他丢失分组或丢失分组组合则被标

记为需进行邻域关联搜索。

3.3 邻域关联搜索

在链路分组丢失率较高的无线网络环境下,经过 HLAR 或 IONCR 算法的邻域搜索能够找到的符合满秩条件的丢失分组或丢失分组组合生成的单个重传分组占总平均重传分组数的比例情况如图2所示。可以看出,随着发送数据分组数的增多,虽然邻域搜索能够找到的满秩丢失分组组合的比例越来越高,但仍有较高比例的丢失分组需要进一步重传处理,而随着接收节点数的增多,这个比例将快速变大。在 HLAR 等算法中,这些丢失分组是逐个分组或可解丢失分组组合进行重传的,IONCR 基于邻域关联搜索进一步挖掘其中的编码机会,从而减少重传次数,提高重传效率。

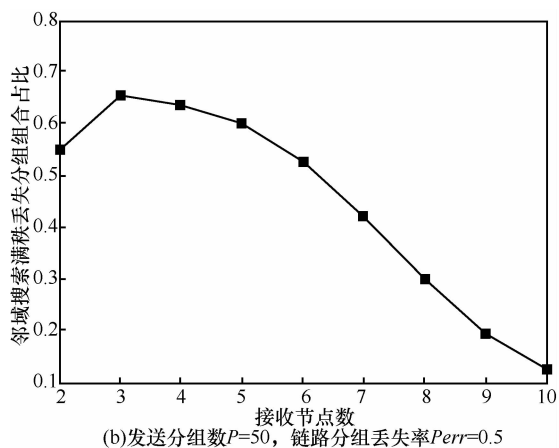
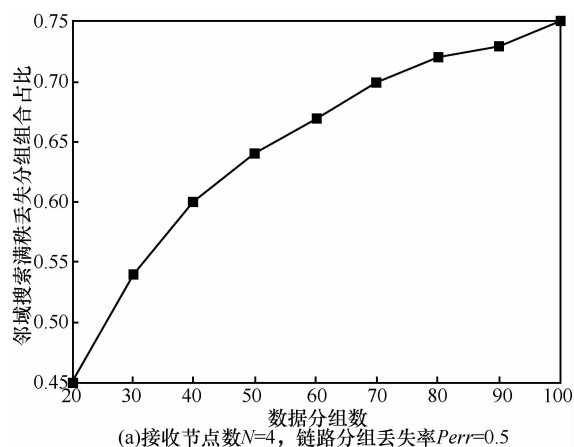


图2 单个重传分组占总平均重传分组数的比例情况

经过散列邻域搜索后,剩下的都是不能基于邻域搜索达到满秩条件的丢失分组或丢失分组组合,但这些丢失分组或丢失分组组合是可解条件下的最大组合,即任意两个丢失分组或丢失分组组合进行编码生成的重传分组中,一

定存在某个接收节点的多个丢失分组导致不可解。例如表2中的 P_8, P_9 和 P_{10} , 其散列值分别为6、5和3, P_8 和 P_9 组合在 R_3 不可解, P_8 和 P_{10} 组合在 R_2 不可解, P_9 和 P_{10} 组合在 R_1 不可解。在HLAR重传策略中, 源节点只能分别发送 P_8, P_9 和 P_{10} , 共需发送3次。为了充分挖掘编码机会, 减少重传次数, IONCR通过3个方式辅助从多个重传分组中恢复丢失分组: 基于散列邻域关联; 允许部分节点解码失败; 允许节点缓存解码失败的编码分组。

表2中, P_8 的散列值为6, 其满秩丢失分组组合的邻域散列值为1, 剩余丢失分组 P_9 和 P_{10} 都不符合, 但 $P_9(5=4+1)$ 和 $P_{10}(3=2+1)$ 的散列值中都含因子1, 跟 P_8 的散列邻域是关联的。在已进行可解条件最大丢失分组组合的情况下, 并根据无线网络中的实际应用情况, 为保证较低的复杂度, IONCR仅利用3个丢失分组或丢失分组组合间的邻域关联, 并采用如下编码原则: 对于丢失分组或丢失分组组合 P_i, P_j 和 P_k , 其散列值(丢失分组组合的散列值是其所包含的所有丢失分组的散列值的和)分别为 h_i, h_j 和 h_k , 若同时满足式(6):

$$\begin{cases} h_i \neq h_j \neq h_k \\ h_i \cup h_j = 2^N - 1, h_j \cup h_k = 2^N - 1 \\ h_i \cap h_j < \overline{h_i \cap h_j}, h_j \cap h_k < \overline{h_j \cap h_k} \\ h_i \cap h_j \neq h_j \cap h_k \end{cases} \quad (6)$$

则可被两两编码在一起进行重传, 且所有接收节点能从这两个重传分组中恢复其丢失分组。其中, $h_i \cup h_j$ 表示 h_i 和 h_j 用二进制表示后按位进行“或(OR)”运算, $h_i \cap h_j$ 表示 h_i 和 h_j 用二进制表示后按位进行“与(AND)”运算, $\overline{h_i \cap h_j}$ 表示对 $h_i \cap h_j$ 取反。

根据式(6), 表2中经过邻域关联搜索后, 将生成 $P_r = P_8 \oplus P_9$ 和 $P_s = P_9 \oplus P_{10}$ 两个重传分组。源节点只需重传这两个数据分组, R_1, R_2 和 R_3 就可通过 P_r 和 P_s 分别恢复其两个丢失分组。

显然, 与普通重传策略和HLAR策略等相比, IONCR策略能够进一步挖掘编码机会, 减少重传次数, 而且其基于邻域搜索的邻域关联搜索仅限于3个丢失分组或可解丢失分组组合之间, 基本保持了与HLAR等相近的算法复杂度。

3.4 重传再丢失的处理

对于重传分组的再丢失处理, IONCR策略根据反馈的接收状态信息还原原始数据分组的接收情况, 并更新

接收状态表, 重新计算接收情况发生变化的丢失分组的散列值并更新丢失分组的散列表, 然后通过散列邻域搜索和邻域关联搜索从丢失分组的散列表中选择丢失分组组合进行编码重传, 基本与原始数据分组的丢失处理相同。状态更新有两种方式: 一是根据每个重传分组反馈的接收信息立刻进行更新(以下简称分组更新), 二是根据每一轮重传中所有重传分组反馈的接收信息进行一次性更新(以下简称轮更新)。本文的IONCR策略采用分组更新方式。

4 仿真结果及分析

本文比较了传统的ARQ重传方法及下述基于ONC的重传方法在平均重传次数和平均执行时间等方面的性能; 参考文献[5]中提出的重传改进算法INCBR; 参考文献[6]中提出的采用数据调度的重传算法HLAR; 本文提出的算法IONCR。为了分析IONCR方法的重传性能, 设计了3组实验, 每组实验都独立运行104次以统计其平均值。

4.1 平均重传次数

本文采用目前常用的平均重传次数^[10-14]作为重传性能分析的评价指标之一。

在有 N 个接收节点的多播网络中, 假定 N 个接收节点的分组丢失率互不相关且服从伯努利分布^[10-14]。在链路分组丢失率较高的情况下, IONCR方法首先快速搜索所有接收节点可以从单个重传分组中得到的各自所需的丢失分组或丢失分组组合, 并使丢失分组在满足可解情况下尽量组合。当数据分组数 M 足够大时, 每个重传分组都可以看成链路分组丢失率最大的接收节点与其余 $N-1$ 个节点丢失分组的编码组合。因此, 平均重传次数由分组丢失率最大的节点决定。这个传输次数服从以 $(1-p_i)$ 为参数的几何分布, 令 p_i 表示接收节点 R_i ($1 \leq i \leq N$)的分组丢失率, 每个数据分组的平均重传次数 (average retransmission number, ARN)可表示为:

$$ARN = \frac{1}{\min\{1-p_i\}} - 1, 1 \leq i \leq N \quad (7)$$

当数据分组数 M 有限时, IONCR方法总能根据散列邻域搜索的结果, 进一步挖掘编码机会来减少重传次数, 从而提高数据传输效率。

当接收节点数 $N=4$, 分组丢失率取0.5时, 在数据分组个数变化的情况下, 4种重传策略的平均重传次数如图3

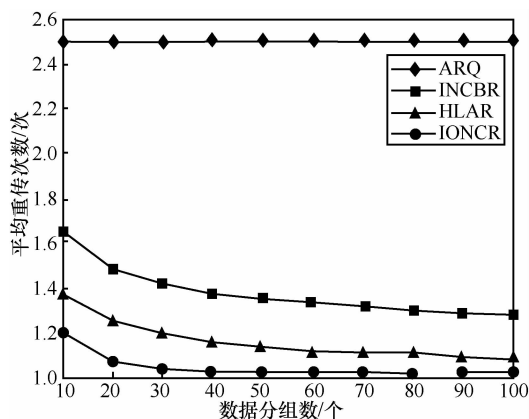


图3 不同数据分组数时重传次数性能的比较

所示。可以看出,与传统的 ARQ 策略相比,基于 ONC 的 3 种重传方法的平均重传次数有明显减少,而且 IONCR 方法的平均重传次数明显少于 HLAR 方法。这是因为,数据分组个数的增加使得接收状态表 Θ 的列数足够大,从而可以提供足够的编码机会,因此 3 种重传策略的平均重传次数曲线是下降的,而 IONCR 方法是在 HLAR 方法的基础上基于邻域关联搜索挖掘了更多的编码机会,平均重传次数最少。

当分组丢失率分别取 0.5、发送 $M=50$ 个数据分组时,在接收节点个数变化的情况下,4 种重传策略的平均重传次数如图 4 所示。可以看出,在高分组丢失率情况下,随着接收节点数的增多,传统 ARQ 方法和 INCBR 方法的平均重传次数都有明显增加,但 INCBR 方法的增加幅度更大。这是因为随着节点数的增多,丢失分组组合不可解的概率增大,INCBR 需要更多地分开进行重传,从而造成重传性能的下降。HLAR 和 IONCR 方法因为已经对丢失分组组合进行了优化,平均重传次数随接收节点数的变化不大。而 IONCR 方法因能比 HLAR 创造更多的编码机会,在所有情况下,其平均重传次数都小于 HLAR。

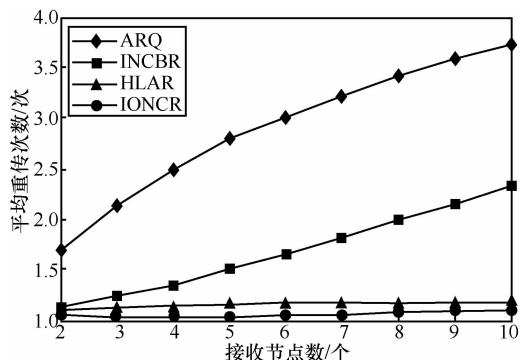


图4 不同接收节点数时重传次数性能的比较

当接收节点数 $N=5$ 、发送 $M=50$ 个数据分组时,在接收节点分组丢失率变化的情况下,4 种重传策略的平均重传次数如图 5 所示。可以看出,基于 ONC 的 3 种重传方法明显优于传统的 ARQ 方法。随着节点分组丢失率的增大,节点丢失分组和重传再丢失的现象将更加严重,所有方法的平均重传次数曲线是上升的,HLAR 和 IONCR 方法因对丢失分组组合进行了优化,性能优于 INCBR 方法。而 IONCR 方法因在 HLAR 方法的基础上通过邻域关联搜索并从多个重传分组中恢复丢失分组,在所有情况下,其平均重传次数都小于 HLAR 方法,而且这种优势随着节点分组丢失率的增大更加明显。

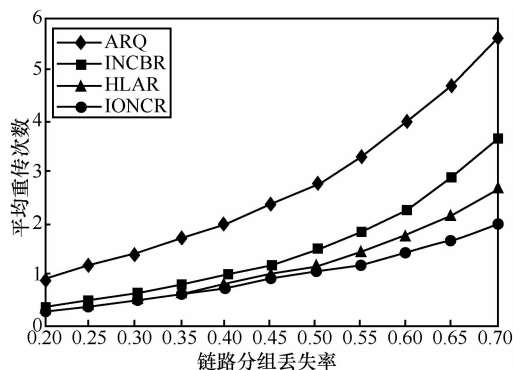


图5 不同分组丢失率时重传次数性能的比较

4.2 复杂度及计算开销

以数据分组数 M 来衡量 IONCR 方法的复杂度。IONCR 的组合策略为:计算丢失分组散列值以及生成散列表的时间复杂度 $O(M)$,存储散列表的空间复杂度是 $O(M)$;根据不同散列值从散列表中搜索一个数据分组的平均复杂度是 $O(1)$,因此 IONCR 方法在散列邻域搜索中从 M 个数据分组中选择不同丢失分组生成重传分组的时间复杂度是 $O(M)$,用于存储重传分组编码方式的空间复杂度也是 $O(M)$;假设散列邻域搜索完全失败,其邻域关联搜索的时间复杂度和空间复杂度与散列邻域搜索相同,都是 $O(M)$ 。综上所述,在复杂度上,IONCR 方法保持了 HLAR 等方法较低的复杂度,总的时间和空间复杂度都为 $O(M)$ 。

图 6(a) 给出了接收节点数 $N=4$ 、分组丢失率分别取 0.5 时,4 种重传方法发送数据分组的平均所需时间随数据分组数量变化的比较情况。测试计算机平台是 Intel Core i5-3210M,4 GB RAM,MATLAB2013。可以看出,总体上 IONCR 方法比 HLAR 方法的平均所需时间略有增加,但相差不多,这是因为 IONCR 方法仅利用 HLAR 散列搜索后不符合满秩条件的 3 个丢失分组或丢失分组组合间的邻

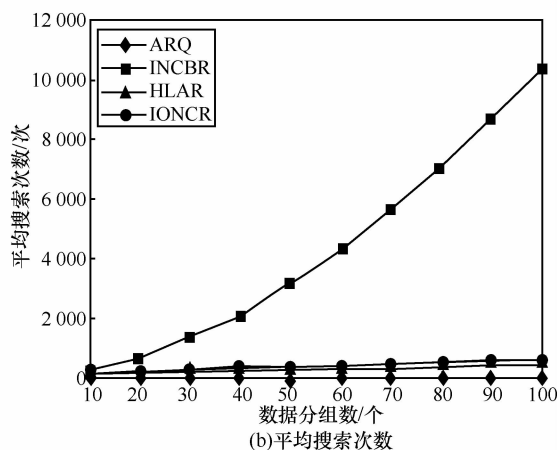
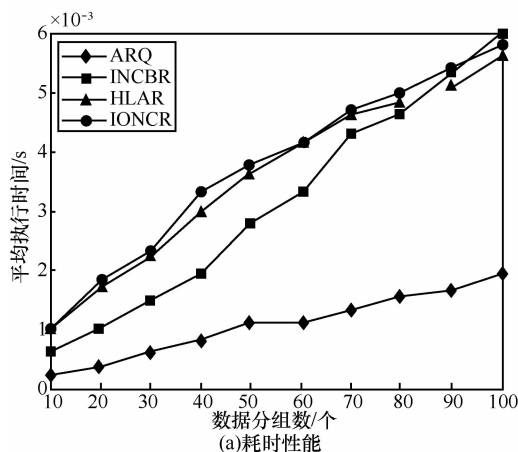


图6 不同数据分组数时的性能比较

域关联进行了简单的线性组合,而 HLAR 方法是将这些丢失分组或丢失分组组合直接进行重传,基本保持了原有的算法复杂度。

图 6(b)给出了接收节点数 $N=4$ 、分组丢失率分别取 0.5 时,4 种重传方法进行丢失分组组合优化的平均搜索次数随数据分组数变化的比较情况。可以看出,ARQ 算法由于发现丢失分组即刻重传,不需搜索;INCBR 算法由于采用可解条件下的逐行逐列扫描搜索方法,搜索空间复杂度为 $O(M^2)$,随着发送数据分组数的增多,平均搜索次数快速上升,搜索性能较差;HLAR 和 IONCR 方法则保持了较低的平均搜索次数,这是因为这两种算法采用邻域搜索缩小了搜索范围,搜索空间复杂度为 $O(M)$,提高了搜索效率,而 IONCR 因在邻域搜索基础上通过邻域关联搜索进一步挖掘编码机会,平均搜索次数比 HLAR 方法略有增多,但基本保持了相同的水平。

4.3 重传反馈更新机制比较

在重传再丢失处理中,IONCR 方法可以采用分组更新

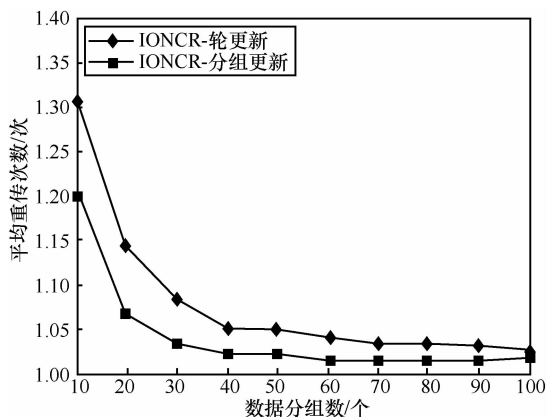


图7 反馈分组更新机制与轮更新机制比较

或轮更新机制对反馈信息进行处理,图 7 给出了接收节点数 $N=4$ 、分组丢失率分别取 0.5、发送分组数从 10 个到 100 个变化时,这两种更新机制对平均重传次数的影响。可以看出,分组更新机制由于有最新的丢失分组信息及时参与到丢失分组组合中,创造了更多的编码机会,总体上性能优于轮更新机制。但随着发送分组数的逐渐增多,两者之间的差距越来越小,这是由于高链路分组丢失率情况下,本身有足够的丢失分组进行组合编码,新反馈的丢失分组信息产生的影响就越来越小。

5 结束语

针对较高链路分组丢失率情况下 HLAR 等方法在重传过程中存在的编码率低、算法性能下降等缺陷,本文提出了改进的基于机会网络编码的重传方法——IONCR,给出了邻域关联搜索的条件。仿真测试结果表明,在保持较低算法复杂度的情况下,IONCR 方法能通过邻域关联搜索发现更多的编码机会,并允许从多个重传分组中恢复其丢失分组,从而减少了平均重传次数,提高了传输效率。

参考文献

- 1 Qureshi J, Foh C H, Cai J F. An efficient network coding based retransmission algorithm for wireless multicast. Proceedings of IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Tokyo, Japan, 2009: 691~695
- 2 Lu X M, Wang X, Feng S, et al. A new wireless broadcasting retransmission algorithm based on multiple nodes network coding technology. Proceedings of 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), Wuhan, China, 2011: 1~4



- 3 Vien Q-T, Stewart B G. An efficient cooperative retransmission for wireless regenerative relay networks. Proceedings of 2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), California, USA, 2012: 4417~4422
- 4 Zhan C, V C S, Wang J P, *et al.* Coding-based data broadcast scheduling in on-demand broadcast. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(11) : 3774~3783
- 5 Traskov D, Heindlmaier M, Médard M, *et al.* Scheduling for network-coded multicast. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(5): 1479~1488
- 6 Wang Y S, Zhang Q Y. An approach on wireless broadcasting retransmission using network coding. Proceedings of 8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), Shanghai, China, 2012: 1~4
- 7 Gong D W, Yang Y, Li H W. An efficient cooperative retransmission MAC protocol for IEEE 802.11n wireless LAN. Proceedings of IEEE 10th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS), Beijing, China, 2013: 191~199
- 8 Go K-Chun, Cha Jae-R, Keun Oh S, *et al.* End-to-end performance analysis based on cross-layer retransmission scheme in wireless communication system. Proceedings of 2013 International Conference on Information Networking (ICOIN), Bangkok, Thailand, 2013: 141~144
- 9 Nguyen D, Tran T, Nguyen T, *et al.* Wireless broadcast using network coding. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(2): 914~925
- 10 肖潇, 王伟平, 杨路明等. 基于网络编码的无线网络广播重传方法. 通信学报, 2009, 20(9) : 69~75
Xiao X, Wang W P, Yang L M, *et al.* Wireless broadcasting retransmission approach based on network coding. Journal on Communications, 2009, 20(9): 69~75
- 11 孙伟, 张更新, 边东明等. 卫星通信中基于网络编码改进的广播重传策略. 宇航学报, 2013, 34(2): 231~236
Sun W, Zhang G X, Bian D M, *et al.* An improved networking-coding-based broadcast retransmission scheme in satellite communications. Journal of Astronautics, 2013, 34 (2): 231~236
- 12 卢冀, 肖嵩, 吴成柯. 一种基于机会式网络编码的高效广播重传方法. 电子与信息学报, 2011, 33(4): 858~863
Lu J, Xiao S, Wu C K. A high efficiency retransmission approach based on opportunistic network coding. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(4): 858~863
- 13 Gou L, Zhang G X, Sun W, *et al.* Weighted broadcasting retransmission based on opportunistic network coding in wireless networks. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(3):749~753
- 14 Zhou Z H, Zhou L. Efficient loss recovery based on network coding in multicast networks. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(8):1962~1967
- 15 Lopes P, Silva Y, Cavalcanti F. Efficient wireless multicast retransmission techniques based on multiple coded packets. Proceedings of IEEE 72nd Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), Ottawa, Ontario, Canada, 2010: 1~5
- 16 Sorour S, Valaee S. An adaptive network coded retransmission scheme for single-hop wireless multicast broadcast services. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 19(3): 869~878

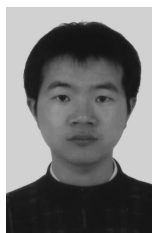
[作者简介]



邵鹏飞,男,浙江工业大学博士生,浙江万里学院副教授,主要研究方向为物联网中的可靠传输和信息融合。



赵燕伟,女,浙江工业大学博士生导师、教授,主要研究方向为先进制造技术、现代物流系统智能配送与优化调度、网络环境下的数字制造技术等。



吴耀辉,男,浙江万里学院讲师,主要研究方向为无线通信、OFDM 系统资源分配。



姚信威,男,博士,浙江工业大学副教授,主要研究方向为无线传感网络。