

# 非完全无线报文重传分析研究及其分治策略

高振国<sup>1,2</sup>, 蔡绍滨<sup>2</sup>, 李 香<sup>2</sup>, 赵蕴龙<sup>2</sup>, 王慧强<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学计算机学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

**摘 要:** 网络编码为无线网络报文重传问题 WPRTPs (Wireless Packet ReTransmission Problems) 提供了有效解决途径. 现有关于 WPRTP 问题的研究主要针对完全无线网络报文重传问题 P-WPRTPs (Perfect WPRTPs), 而尚未发现对非完全无线网络报文重传问题 IP-WPRTPs (ImPerfect WPRTPs) 的专门研究. 本文研究了 IP-WPRTP 问题, 证明了无线报文重传问题的归约定理, 分析了 IP-WPRTP 问题最优线性网络编码报文重传策略中报文重传数量的上限和下限. 然后利用分治思想提出了 IP-WPRTP 问题网络编码策略 IP-WPRTP-DC (Divide and Conquer based scheme for IP-WPRTPs). 仿真测试表明 IP-WPRTP-DC 相对于传统非网络编码策略明显节省了报文传输数量.

**关键词:** 非完全无线报文重传问题; 分治策略; 问题归约; 最优策略; 随机网络编码

**中图分类号:** TN911      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2011) 07-1683-06

## Analysis on Imperfect Wireless Packet Retransmission Problems and Its Divide-and-Conquer Based Scheme

GAO Zhen-guo<sup>1,2</sup>, CAI Shao-bin<sup>2</sup>, LI Xiang<sup>2</sup>, ZHAO Yun-long<sup>2</sup>, WANG Hui-qiang<sup>2</sup>

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

2. College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** NC (Network Coding) provides an interesting approach to WPRTPs (Wireless Packet ReTransmission Problems) in wireless networks. Existing researches are mostly focused on P-WPRTPs (Perfect WPRTPs) where, for one receiver, a packet is either being requested by or already known to it. Contrastively, no previous efforts focus on IP-WPRTPs (ImPerfect WPRTPs) where, for one receiver, a packet can be neither being requested by nor already known to it. In this paper, we focus on IP-WPRTPs. WPRTP reduction theorem for simplifying WPRTPs is proposed and proved at First. Then, the upper and lower bounds of the number of packet transmissions in optimal linear NC-based solutions to IP-WPRTPs are analyzed. Next, a scheme named as IP-WPRTP-DC (Divide and Conquer based scheme for IP-WPRTPs) is proposed based on WPRTP reduction theorem using a divide and conquer approach. Extensive simulations showed that IP-WPRTP-DC is more effective in saving the number of packet transmissions for solving IP-WPRTPs than traditional schemes not using network coding.

**Key words:** imperfect wireless packet retransmission problems; divide-and-conquer based scheme; problem reduction; optimal scheme; random network coding

## 1 引言

无线网络中传输的报文经常会出错或丢失, 所以报文重传是无线网络报文传输中的基本操作, 研究高效的报文重传策略具有重要意义. 本文研究无线报文重传问题, 其基本应用场景如下: 1 个发送节点需要向若干个接收节点发送一批报文, 这些接收节点都在发送节点的无线电波覆盖范围内. 各接收节点已经通过某种途径获得了其中部分报文, 所以请求发送节点重传自己感兴趣的部分报文. 因此, 发送节点需要重新传输一些报文以

使各接收节点都能获得自己所需的所有报文. 为节省开销, 发送节点要尽量减少重传的报文数量.

网络编码 NC(Network Coding)<sup>[1]</sup>为无线报文重传问题研究开辟了新思路. 网络编码的数学基础是伽罗瓦域 Galois Field(又称有限域  $GF(2^d)$ ). NC 融合了路由和编码, 允许节点对多个报文进行组合后再传输, 目的节点通过解码得到原始报文. 随机网络编码 RNC(Random Network Coding)<sup>[2]</sup>的出现促进了其分布式应用. 研究表明<sup>[3]</sup>, 网络编码可显著提高无线网络吞吐量、可靠性、负载均衡性等.

在解决无线报文重传问题时,利用网络编码技术把要重传的报文编码组合后再重传出去,各接收节点则可能结合自己已知报文从重传编码报文中解析出自己所需各原始报文.若重传报文数量少于需重传原始报文数量,则可降低重传开销.已有一些研究从理论和技术等层面对网络编码应用于无线网络报文重传问题做了研究,如文献[4~7]等研究了其理论基础,而文献[4,8~10]等研究了其网络编码搜索策略.文献[4]证明了在伽罗瓦域 GF(2)上搜索无线网络报文重传问题的最优网络编码方案是 NP-Complete 问题,并在 GF(2)上提出了解决该问题的启发式网络编码方案搜索算法.文献[8]用图论来研究无线报文重传问题的 GF(2)上网络编码方案,把有效网络编码方案的搜索转化为寻找图中的最少团划分问题,称该策略为 CliqueNC(Clique based Network Coding).文献[9]提出了两种基于网络编码的重传机制,其编码核心思想与文献[8]相同.文献[10]等解除了编解码操作在域 GF(2)上的限制,研究了完全无线报文重传问题最优策略的报文重传数量,并基于 RNC 提出了最优策略,但其局限于完全无线报文重传问题.

现有关于 WPRTP 问题的研究主要针对完全无线网络报文重传问题,而尚未发现对非完全无线网络报文重传问题的专门研究.而实际应用中后者有较普遍的实践基础.因此,研究非完全无线报文重传问题的解决方案具有重要意义.本文针对非完全无线报文重传问题进行了研究.

## 2 无线报文重传问题规约及性质

### 2.1 无线报文重传问题的相关定义

**定义 1** 无线报文重传问题 WPRTP(Wireless Packet ReTransmission Problem).一个 WPRTP 问题可用四元组描述:  $WPRTP\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$ , 其中, (1)  $P = \{p_i | i \in \{1, 2, \dots, |P|\}\}$  为报文集合; (2)  $R = \{r_i | i \in \{1, 2, \dots, |R|\}\}$  为接收节点集合(为便于描述,在无歧义前提下,我们用接收节点的序号  $i$  指代接收节点  $r_i$ ); (3)  $H_i$  为  $r_i$  的已知报文集合,  $\{H_i\}$  为所有接收节点的已知报文集合的集合; (4)  $W_i$  为  $r_i$  需求报文集合,  $\{W_i\}$  为所有接收节点的需求报文集合的集合. WPRTP 问题的目标是:在各接收节点都能根据重传的报文及其他已有信息正确解析出所需各原始报文的前提下,确定所需网络编码系数及需要重传报文的数量,使所需重传报文数量最小.本文分析中均假定各接收节点都能正确收到重传报文(该假设在相关文献中普遍采用).

若一网络编码方案能保证各接收节点正确解码得出所需各原始报文,则该方案为该问题的有效方案.重传报文数量最少的有效方案称为最优方案(本文中仅

考虑线性网络编码). WPRTP 问题中,若  $P = H_i \cup W_i$  对  $\forall i$  均成立则称为完全无线报文重传问题 P-WPRTPs (Perfect WPRTPs), 否则称为非完全无线报文重传问题 IP-WPRTPs (ImPerfect WPRTPs).

文献[10]对 P-WPRTP 问题得出如下定理 1.

**定理 1**<sup>[10]</sup> 完全无线报文重传问题  $WPRTP\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  的最优线性网络编码策略中所需重传报文数量为  $\max_{i \in R} |W_i|$ .

**定义 2** 无线报文重传问题的归约. WPRTP 问题有可能简化成较小的 WPRTP 问题,若简化后的 WPRTP 问题的任意有效(最优)方案仍是原 WPRTP 问题的有效(最优)方案,则称满足这种条件的 WPRTP 问题简化过程称为 WPRTP 问题的归约.

### 2.2 无线报文重传问题的归约

关于 WPRTP 问题的归约,我们有如下定理 2.

**定理 2** WPRTP 问题归约定理. 一个  $WPRTP\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  问题可归约成  $WPRTP\{P', R', \{H'_i\}, \{W'_i\}\}$  问题, 其中  $R' = \{r_i | W_i \neq \emptyset, r_i \in R\}$ ,  $W'_i = W_i$ ,  $P' = \bigcup_{i \in R} W_i$ ,  $H'_i = H_i \cap (\bigcup_{i \in R} W_i)$ .

**证明** (1) 证明  $WPRTP\{P', R', \{H'_i\}, \{W'_i\}\}$  问题的任意有效方案均是  $WPRTP\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  问题的有效方案.

$R-R'$  中接收节点均没有需要重传的报文,因此  $WPRTP\{P', R', \{H'_i\}, \{W'_i\}\}$  的任意有效方案对  $R-R'$  中接收节点均是有效方案.对  $R \cap R'$  中各接收节点,其在  $WPRTP\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  问题中的现有报文集合均是  $WPRTP\{P', R', \{H'_i\}, \{W'_i\}\}$  中相应接收节点的现有报文集合的超集,所以  $WPRTP\{P', R', \{H'_i\}, \{W'_i\}\}$  的任意有效方案对  $WPRTP\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  问题中  $R'$  内各接收节点也肯定是有效方案.综上,  $WPRTP\{P', R', \{H'_i\}, \{W'_i\}\}$  问题的任意有效方案对  $WPRTP\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  问题中  $(R-R') \cup (R \cap R') = R$  内各接收节点来说均是有效方案,即  $WPRTP\{P', R', \{H'_i\}, \{W'_i\}\}$  的任意有效方案均是  $WPRTP\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  的有效方案.

(2) 证明  $WPRTP\{P', R', \{H'_i\}, \{W'_i\}\}$  问题的任意最优方案均是  $WPRTP\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  问题的最优方案.下面用反证法证明.

根据最优方案定义知,最优方案均是有效方案,且最优方案中重传报文数量最少,而一 WPRTP 问题所有最优方案重传报文数量均相等.

假设存在  $WPRTP\{P', R', \{H'_i\}, \{W'_i\}\}$  的某最优方案  $s_1$  且  $s_1$  不是  $WPRTP\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  的最优方案,方案  $s_1$  重传报文数量  $|s_1| = k$ . 显然,  $s_1$  肯定是  $WPRTP\{P', R', \{H'_i\}, \{W'_i\}\}$  的有效方案.根据上一步

证明知,  $s_1$  也是  $\text{WPRTP}\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  的有效方案. 假设某方案  $s_2$  为  $\text{WPRTP}\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  问题的一个最优方案, 由于  $s_1$  不是其最优方案, 所以  $s_2$  中报文重传数量  $|s_2| = k' < k$ . 下面根据方案  $s_2$  构造  $\text{WPRTP}\{P', R', \{H_i'\}, \{W_i'\}\}$  问题的一个有效方案.

设方案  $s_2$  的编码操作表示为式(1):

$$P_Y = M \cdot P_X \quad (1)$$

其中  $P_Y = [p_{Y,1}, p_{Y,2}, \dots, p_{Y,k}]^T$  为编码报文向量,  $P_X = [p_{X,1}, p_{X,2}, \dots, p_{X,|P|}]^T = [p_1, p_2, \dots, p_{|P|}]^T$  为原始报文向量,  $M$  为  $k' \times |P|$  型网络编码系数矩阵.

针对式(1)作如下变换:(1)把  $P_X = [p_{X,1}, p_{X,2}, \dots, p_{X,|P|}]^T$  中属于  $P'$  的原始报文组合成向量  $P_X' = [p'_{X,1}, p'_{X,2}, \dots, p'_{X,|P'|}]^T$ , 而属于  $P'' = P - P'$  的原始报文组合成向量  $P_X'' = [p''_{X,1}, p''_{X,2}, \dots, p''_{X,|P''|}]^T$ ; (2)相应的, 把编码系数矩阵  $M$  按列分为两部分  $M'$  和  $M''$ , 则式(1)可重写为式(2):

$$P_Y = M' \cdot P_X' + M'' \cdot P_X'' \quad (2)$$

式(2)可进一步转换为式(3):

$$P_Y - M'' \cdot P_X'' = P_Y' = M' \cdot P_X' \quad (3)$$

把式(3)作为编码方案  $s_3$ , 它肯定是  $\text{WPRTP}\{P', R', \{H_i'\}, \{W_i'\}\}$  的有效方案. 方案  $s_3$  中需要重传的报文数量  $|s_3| = |s_2| = k' < k = |s_1|$ , 这与  $s_1$  是  $\text{WPRTP}\{P', R', \{H_i'\}, \{W_i'\}\}$  的最优方案这一假设相矛盾. 所以,  $\text{WPRTP}\{P', R', \{H_i'\}, \{W_i'\}\}$  的最优方案也是  $\text{WPRTP}\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  的最优方案.

综上所述, 得证.

### 2.3 最优方案中报文重传输数量的上下限

**定理 3** IP-WPRTP  $\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  问题最优线性网络编码方案中重传报文数量  $k \leq \max_{i \in R} |P - H_i|$ .

**证明** 把 IP-WPRTP  $\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  按式(4)所示规则转换成 P-WPRTP  $\{P', R', \{H_i'\}, \{W_i'\}\}$ .

$$P' = P, R' = R, H_i' = H_i, W_i' = P - H_i \quad (4)$$

由定理 1 得 P-WPRTP  $\{P', R', \{H_i'\}, \{W_i'\}\}$  的最优方案中报文重传数量  $k' = \max_{i \in R} |W_i'| = \max_{i \in R} |P - H_i|$ . 根据式(4)所示转换规则易知, P-WPRTP  $\{P', R', \{H_i'\}, \{W_i'\}\}$  任意最优方案  $s_1$  肯定是 IP-WPRTP  $\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  的有效方案, 而反之不一定成立, 所以 IP-WPRTP  $\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  的最优方案中报文重传数量  $k$  应满足  $k \leq k' = \max_{i \in R} |P - H_i|$ . 证毕.

**定理 4** IP-WPRTP  $\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  问题最优线性网络编码方案中重传报文数量  $k \geq \max_{i \in R} |W_i|$ .

**证明** 用定理 3 中类似方法证明. 本处略去.

## 3 IP-WPRTP 问题的解决策略

基于无线报文重传问题的归约理论, 提出了非完

全无线报文重传问题的分治算法.

### 3.1 编码方案的分治搜索算法

IP-WPRTP 问题的网络编码方案的分治搜索算法的基本思想分为如下几步:

(1)原问题  $\text{WPRTP}\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  的报文集合  $P$  按某种规则分成  $n$  个分组  $\{P^1, P^2, \dots, P^k, \dots, P^n\}$ , 从而形成  $n$  个较小子问题  $\text{WPRTP}\{P^k, R^k, \{H_i^k\}, \{W_i^k\}\}$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, n\}$ , 其中参数满足式(5).

$$R^k = R, H_i^k = P^k \cap H_i, W_i^k = P^k \cap W_i \quad (5)$$

(2)分别针对各个子问题继续分解为较小子问题, 直到子问题成为 P-WPRTP 问题, 而 P-WPRTP 问题的最优重传策略可根据文献[10]直接确定.

IP-WPRTP 问题的分治算法的核心函数称作  $\text{WPRTP\_DivideAndConquer}(\cdot)$ , 它采用分治算法尽量搜索最优的编码方案. 该函数返回编码矩阵模版, 其元素为 0 或 1. 需要根据编码矩阵模版构造最终编码矩阵. 其工作流程如图 1 所示.

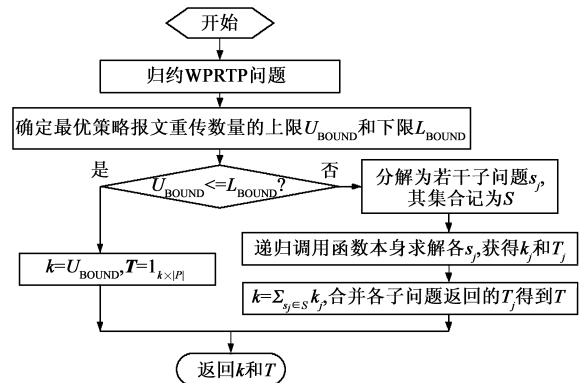


图 1  $\text{WPRTP\_DivideAndConquer}(\cdot)$  工作流程图

$\text{WPRTP\_DivideAndConquer}(\cdot)$  工作描述如下:

**WPRTP\_DivideAndConquer**  $(P, R, \{H_i\}, \{W_i\})$

输入:  $P, R, \{H_i\}, \{W_i\}$ ;

输出:  $k$ : 报文重传数量;  $T = \{t_{i,j}\}$ : 编码矩阵模版;

(1)规约待求解  $\text{WPRTP}\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  问题;

(2)确定  $\text{WPRTP}\{P, R, \{H_i\}, \{W_i\}\}$  问题的上限  $U_{\text{BOUND}}$  和 下限  $L_{\text{BOUND}}$ ;

(3)若  $U_{\text{BOUND}} \leq L_{\text{BOUND}}$ , 则  $k = U_{\text{BOUND}}$ ,  $T = \mathbf{1}_{k \times |P|}$  (表示  $k \times |P|$  型全 1 矩阵), 函数返回  $k, T$ ;

(4)把  $\text{WPRTP}$  问题按分解规则分解为若干子问题  $s_j \in S$  ( $S$  代表子问题的集合) 并分别调用  $\text{WPRTP\_DivideAndConquer}(\cdot)$  求解, 获得各子问题  $s_j$  的解  $k_j$  和  $T_j$ ;

(5)  $k = \sum_{s_j \in S} k_j$ , 合并各子问题返回的  $T_j$  得  $T$ ;

(6)函数返回  $k$  和  $T$ ;

$T$  由各子问题  $s_j$  (设其报文集合为  $P_j$ ) 返回的  $T_j$  合并而成, 合并方法为: 扩展  $T_j$  列数至当前问题中报文数量  $|P|$  得到  $k_j \times |P|$  型新矩阵  $T_j'$ ,  $T_j'$  中对应  $P_j$  的部分

等于  $T_j$ , 其余元素为 0. 各子问题  $s_j$  相应的  $T'_j$  按列连接, 得到  $k \times |P|$  型矩阵  $T$ . 最终编码矩阵  $M = \{m_{i,j}\}$  的个元素需要根据  $T$  按式(6)构造, 其中  $rand(\cdot)$  表示从输入参数集合中随机选取.

$$m_{i,j} = \begin{cases} rand(GF(2^q)/\{0\}), & t_{i,j} = 1 \\ 0, & t_{i,j} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

### 3.2 IP-WPRTP 问题的分治策略

以上述分治算法为核心, 结合编码矩阵构造方法, 提出了 IP-WPRTP 问题策略 IP-WPRTP-DC. 基于网络编码的报文传输过程中, 网络编码系数向量需同编码报文组合成组合报文后再传输. IP-WPRTP-DC 中组合报文包括三个基本字段: *PacketBitFlag*、*CodingCoefVector*、*CodedPacket*. *PacketBitFlag* 是长度为  $|P|$  的位串, 用于指示生成相应编码报文所用原始报文情况. *CodingCoefVector* 保存了相应的编码系数向量. *CodedPacket* 保存编码报文. IP-WPRTP-DC 中发送节点工作流程如图 2 所示.

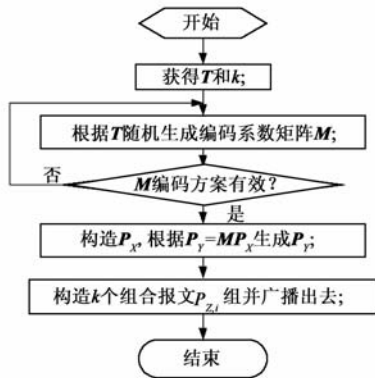


图2 IP-WPRTP-DC策略中发送节点工作流程图

IP-WPRTP-DC 中发送节点的工作过程:

- (1) 调用函数  $WPRTP\_DivideAndConquer(\cdot)$  获得编码矩阵模版  $T$  和需要重传的编码报文数量  $k$ ;
- (2) 按式(6)根据编码矩阵模版  $T$  构造编码矩阵  $M$ ;
- (3) 发送节点判断  $M$  是否构成有效方案. 若是则转到第(4)步; 否则转到第(2)步;
- (4) 构造报文向量  $P_X = [p_1, p_2, \dots, p_{|P|}]^T$ , 并据  $P_Y = M \cdot P_X$  得编码报文向量  $P_Y = [p_{Y,1}, p_{Y,2}, \dots, p_{Y,k}]^T$ ;
- (5) 构造  $k$  个组合报文  $p_{Z,i} = \{flag_i, m_i, p_{Y,i}\}$  ( $i \in \{1, 2, \dots, k\}$ ).  $flag_i$  代表 *PacketBitFlag* 字段的内容,  $flag_i = t_i = [t_{i,1}, t_{i,2}, \dots, t_{i,|P|}]$ , 其中  $t_{i,j}$  为编码矩阵模版  $T$  中元素;  $m_i = (m_{i,1}, m_{i,2}, \dots, m_{i,|P|})$ ;  $p_{Y,i}$  是  $P_Y$  中编码报文;
- (6) 广播所有组合报文  $p_{Z,i}$ , ( $i \in \{1, 2, \dots, k\}$ ); 结束.

### 3.3 报文分组方法

无线报文重传问题中子问题分解的关键是报文分

组. 通过仿真对多种较典型的分组方法进行了比较测试, 所测试的分组方法及结果如表 1 所列. 经过仿真测试发现其中最好方法是: 按接收节点  $j = \arg \max_{i \in R} |W_i \cup H_i|$  的报文请求情况分为两组:  $W_j \cup H_j, P - W_j \cup H_j$ . 因此, IP-WPRTP-DC 策略中使用了这种报文分组方法.

表1 无线报文重传问题分治算法中报文分组方法的比较

测试	方法	分组方法说明	性能
1 分组基准测试	(1)	按接收节点 $j = \arg \max_{i \in R}  W_i \cup H_i $ 的报文请求情况分为两组: $W_j \cup H_j, P - W_j \cup H_j$ .	优
	(2)	按随机方法把报文集合 $P$ 分为两组. 分组内报文数量及分组中的报文都随机确定.	劣
2 分组数量测试	(1)	按接收节点 $j = \arg \max_{i \in R}  W_i \cup H_i $ 的报文请求情况分为两组: $W_j \cup H_j, P - W_j \cup H_j$ .	优
	(2)	按接收节点 $j = \arg \max_{i \in R}  W_i \cup H_i $ 的报文请求情况分为三组: $W_j, H_j, P - W_j \cup H_j$ .	劣
3 分组参考节点测试	(1)	按接收节点 $j = \arg \max_{i \in R}  W_i \cup H_i $ 的报文请求情况分为两组: $W_j \cup H_j, P - W_j \cup H_j$ .	优
	(2)	按接收节点 $j = \arg \max_{i \in R}  W_i $ 的报文请求情况分为两组: $W_j \cup H_j, P - W_j \cup H_j$ .	劣
	(3)	按接收节点 $j = \arg \min_{i \in R}  W_i \cup H_i $ 的报文请求情况分为两组: $W_j \cup H_j, P - W_j \cup H_j$ .	劣
	(4)	按接收节点 $j = \arg \min_{i \in R}  W_i $ 的报文请求情况分为两组: $W_j \cup H_j, P - W_j \cup H_j$ .	劣
	(5)	按随机选定接收节点 $j$ 的报文请求情况分为两组: $W_j \cup H_j, P - W_j \cup H_j$ .	劣
4 报文组合分组测试	(1)	按接收节点 $j = \arg \max_{i \in R}  W_i \cup H_i $ 的报文请求情况分为两组: $W_j \cup H_j, P - W_j \cup H_j$ .	优
	(2)	按接收节点 $j = \arg \max_{i \in R}  W_i \cup H_i $ 的报文请求情况分为两组: $W_j, P - W_j$ .	劣
	(3)	按接收节点 $j = \arg \max_{i \in R}  W_i \cup H_i $ 的报文请求情况分为两组: $H_j, P - H_j$ .	劣

## 4 仿真测试

在 Matlab 中通过仿真测试了 IP-WPRTP 问题的几个解决策略的性能. 采用的性能指标为相对重传报文数量, 即策略的重传报文数量的比值.

IP-WPRTP( $P, R, \{H_i\}, \{W_i\}$ ) 的主要参数包括: 原始报文数量  $|P|$ 、接收节点数量  $|R|$ 、网络编码系数位数  $q$ 、报文关注概率  $c_{Level}$  (指对任一接收节点  $r_i$ ,  $P$  中一个报文  $p$  满足  $p \in H_i \cup W_i$  的概率); 报文需求概率  $p_{Level}$  (指对任一接收节点  $r_i$ , 在报文  $p \in H_i \cup W_i$  的条件下,  $p \in W_i$  的概率). 一个组合 ( $|P|, |R|, c_{Level}, p_{Level}, q$ ) 称作一个仿真配置. 所用域  $GF(2^d)$  需满足  $d \geq q$ , 且根据文献[10]中仿真结果固定  $d = q = 8$ . 针对每种仿真配置随机生成 100 个 WPRTP 问题实例, 并用待测策略处理每个实例. 取 100 次平均值作为最终结果, 并计算 95% 可信区间.

测试策略包括: IP-WPRTP-DC、CliqueNC<sup>[8]</sup>、NoNC (表示不采用网络编码技术的传统重传策略). 此外, 根据定理 3 和定理 4 可得到 IP-WPRTP 问题最优方案中报文

重传数量的上限和下限,其结果分别标记为 IP-WPRT-P-MAX 和 IP-WPRT-P-MIN.在用各策略处理 WPRT-P 问题实例之前都先对 IP-WPRT-P 问题进行归约. CliqueNC 是针对 P-WPRT-P 问题提出的,用 CliqueNC 处理 IP-WPRT-P 问题之前先令  $W_i = P - H_i (i \in \{1, 2, \dots, |R|\})$ ,从而转化成 P-WPRT-P 问题.

首先测试了  $|P|$  和  $|R|$  对各策略性能的影响.仿真配置参数设置如下:  $c_{level} = 0.8, p_{level} = 0.7, |P|$  从 3 增加到 30,每次递增 3,  $|R|$  从 3 增加到 30,每次递增 3.结果如图 3 所示.结果表明, CliqueNC 相对于 NoNC 的性能优势随  $|R|$  增加而迅速减弱,当  $|R| = 3$  且  $|P| = 30$  时, CliqueNC 重传报文数量相对于 NoNC 节省了约 15%,而当  $|R| = 10$  时, CliqueNC 报文重传数量已与 NoNC 趋近相同.当  $|R| = 3$  且  $|P| = 30$  时, IP-WPRT-P-DC 重传报文数量相对于 NoNC 节省了约 20%,虽然 IP-WPRT-P-DC 相对于 NoNC 的性能优势随  $|R|$  增加也呈减弱趋势,但其减弱速度较慢,即使当  $|R| = 30$  时, IP-WPRT-P-DC 策略的报文重传数量相对于 NoNC 仍节省约 10%.随着  $|P|$  增大, CliqueNC 相对于 NoNC 的性能优势基本不变,而 IP-WPRT-P-DC 相对于 NoNC 的性能优势近似线性增加.这些结果说明 IP-WPRT-P-DC 在节省报文重传数量方面明显优于 CliqueNC.

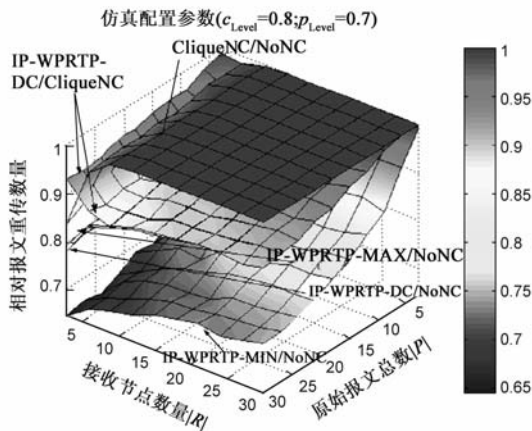


图3 报文数量和接收节点数量对各策略相对性能的影响

然后测试了  $c_{level}$  和  $p_{level}$  对各策略性能的影响.仿真配置参数设置如下:  $|P| = 10, |R| = 10, c_{level}$  从 0.2 增加到 1,每次递增 0.1;  $p_{level}$  从 0.2 增加到 1,每次递增 0.1.仿真结果如图 4 所示.结果表明,  $p_{level}$  越小, IP-WPRT-P-DC、IP-WPRT-P-MAX、CliqueNC 相对于 NoNC 的优越性越明显,而对于特定的  $p_{level}$ ,当  $c_{level}$  接近 0.7 时优势最大.在  $p_{level} = 0.3$  且  $c_{level} = 0.7$  时, IP-WPRT-P-DC 相对于 CliqueNC 节省重传报文数量约 20%.

本节仿真结果显示, IP-WPRT-P-DC 的性能相对于 CliqueNC 有明显提高,但 IP-WPRT-P-DC 相对上限 IP-WPRT-P-MAX 的改进不大,但这并不完全说明分治算法

无效,而原因也可能是 IP-WPRT-P 问题的上限值与最优值已经非常接近.

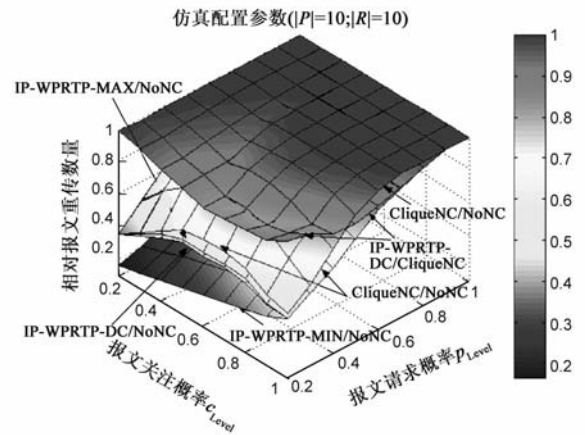


图4 报文关注概率和报文需求概率对各策略相对性能的影响

## 5 结论

本文研究了非完全无线报文重传问题,证明了非完全无线报文重传问题的归约定理,分析了其最优线性网络编码报文重传策略中报文重传数量的上限和界限.然后基于分治思想提出了非完全无线报文重传问题的网络编码方案的分治搜索算法和策略 IP-WPRT-P-DC.仿真表明 IP-WPRT-P-DC 的性能相对于 CliqueNC 有明显提高.

## 参考文献

- [1] Rudolf Ahlswede, Ning Cai, Shuo-Yen Robert Li, Raymond W. Yeung. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204 - 1216.
- [2] Tracey Ho, Muriel Médard, Jun Shi, Michelle Effros, David R Karger. On randomized network coding[A]. Proceedings of 41st Allerton Conference on Communication, Control, and Computing[C]. Monticello, IL, USA, 2003. 121 - 128.
- [3] Christina Fragouli, Dina Katabi, Athina Markopoulou, Muriel Médard, Hariharan Rahul. Wireless network coding: opportunities & challenges[A]. IEEE Military Communications Conference[C]. Orlando, Florida, USA: IEEE Press, 2007. 1 - 8.
- [4] Salim Y. El Rouayheb, Mohammad Asad R. Chaudhry, Alex Sprintson. On the minimum number of transmissions in single-hop wireless coding networks[A]. Proceedings of IEEE Information Theory Workshop[C]. Lake Tahoe, California, USA: IEEE Press, 2007. 120 - 125.
- [5] Salim Y El Rouayheb, Alex Sprintso, Costas N Georghiades. On the index coding problem and its relation to network coding and matroid theory[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(7): 3187 - 3195.
- [6] Bar-Yossef Z, Birk Y, Jayram T S, Ko T. Index coding with side information[A]. Proceedings of 47th Annual IEEE Sym-

posium on Foundations of Computer Science [C], Berkeley, California, USA: IEEE Press, 2006. 197 - 206.

- [7] Yunnan Wu, Jitendra Padhye, Ranveer Chandra, Venkat Padmanabhan, Philip A. Chou. The local mixing problem [A]. Proc of Information Theory and Applications Workshop [C]. San Diego, USA: IEEE Press, 2006. 101 - 108.
- [8] 许胤龙, 詹成, 罗文, 李沛. Ad hoc 网络中基于网络编码的可靠组播 [J]. 中国科技大学学报, 2008, 38(7): 860 - 866.  
Yinlong Xu, Cheng Zhan, Wen Luo, Pei Li. Network coding based reliable multicast for wireless ad hoc networks [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2008, 38(7): 860 - 866. (in Chinese).
- [9] Dong Nguyen, Tuan Tran, Thinh Nguyen, Bella Bose. Wireless broadcast using network coding [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(2): 914 - 925.
- [10] 高振国, 赵蕴龙, 蔡绍滨, 赵金华. 基于随机网络编码技术的最优无线报文重传策略 [J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(2): 231 - 234.  
Zhenguo Gao, Yunlong Zhao, Shaobin Cai, Jinhua Zhao. A random network coding based optimal scheme for wireless packet retransmission problems [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 36(2): 231 - 234. (in Chinese)



**蔡绍滨** 男, 1973 年生, 博士, 哈尔滨工程大学计算机学院教授. 研究方向: 无线自组网、无线传感器网络.



**李 香** 女, 1975 年生, 博士, 哈尔滨工程大学计算机学院副教授. 研究方向: 无线网络等.



**赵蕴龙** 男, 1975 年生, 博士, 哈尔滨工程大学计算机学院副教授. 研究方向: 无线网络、网络编码等.

## 作者简介



**高振国** 男, 1976 年生, 博士, 哈尔滨工程大学自动化学院教授. 研究方向: 网络编码、认知无线网络、博弈论应用等.

E-mail: gag@hrbeu.edu.cn

**王慧强** 男, 1960 年生, 博士, 教授、博士生导师, 中国计算机学会容错计算、开放系统与分布式系统和网络与数据通信等三个专业委员会委员, 黑龙江省计算机学会理事并兼任网络分会主任.