

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201707170

# 无线认知自组网报文多播问题：随机网络编码方法

陈炳才<sup>1,2</sup>, 高振国<sup>1</sup>, 余超<sup>1</sup>, 卢志茂<sup>1</sup>, 丁男<sup>1</sup>

(1.大连理工大学 计算机科学与技术学院, 辽宁 大连 116024; 2.新疆师范大学 计算机科学技术学院, 乌鲁木齐 830054)

**摘要:** 基于随机网络编码技术研究了无线认知自组网的报文多播传输技术. 首先提出报文多播传输的核心问题, 称作多信道单跳报文多播问题 (multi-channel single-hop wireless multicast problem, MCSHWMP), 并且给出多信道单跳报文多播问题的定义, 基于此提出其四元模型; 然后提出基于网络编码技术的无线认知自组网报文多播传输算法框架, 并根据该框架提出几种候选算法. 所提算法通过网络编码技术充分利用无线通信的广播性质, 显著节省了无线认知自组网报文多播传输报文传输数量; 综合考虑无线认知自组网传输网络节点间不同信道的访问权限及报文的传输质量, 使上游网络节点的每次报文传输都能使后续节点的报文收益得到最大化; 从而有效节省多播传输组合报文中用于解码的附加信息, 同时降低无线认知自组网传输报文的长度. 仿真测试与分析结果表明, 针对多信道单跳报文多播问题基于网络编码技术的算法相对于非网络编码算法明显节省报文传输数量, 且在链路报文传输成功率较高但小于1时优势较大, 节省报文数量可达50%.

**关键词:** 随机网络编码; 无线认知自组网; 多播; 广播; 链路可靠性

中图分类号: TN911

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)04-0193-06

## Approach to multicast problems of cognitive-radio-network a random network coding based approach

CHEN Bingcai<sup>1,2</sup>, GAO Zhenguo<sup>1</sup>, YU Chao<sup>1</sup>, LU Zhimao<sup>1</sup>, DING Nan<sup>1</sup>

(1. College of Computer Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

2. College of Computer Science and Technology, Xinjiang Normal University, Urumchi 830054, China)

**Abstract:** Packet multicast technology in cognitive radio ad-hoc networks (CRAN) is researched using a random network coding (RNC) based approach. A basic problem, which is termed as multi-channel single-hop wireless multicast problem (MCSHWMP), of packet multicast applications in CRAN is investigated. Definition about MCSHWMP and its 4-element tuple model were provided. A network coding based scheme framework for packet multicast applications in CRAN is described and based on which, several candidate schemes are proposed. Exploiting the broadcast nature of wireless transmissions by using RNC, necessary packet transmissions are reduced greatly. Considering opportunistic accessibility of wireless channels and heterogeneous packet reception success ratio of different wireless channels, each packet transmission is tried to maximize the packet reception gain of the receivers. Packet size to be transmitted is effectively shortened by reducing decoding information to be transmitted in the packet. Simulation results showed that, network coding based schemes can save much packet transmissions when compared with non-network coding based schemes, and the superiority of network coding based schemes is more distinctive when packet reception success ratio of wireless links is nearly but smaller than 1, in those cases, nearly 50% packet transmissions could be saved.

**Keywords:** random network coding; cognitive radio ad hoc networks; multicast; broadcast; link reliability

认知无线电自组织网络<sup>[1]</sup>(CRAN)是采用认知无线电技术<sup>[2]</sup>的无线多跳网络,能自动发现并不影响授权用户的情况下利用空闲频谱,解决频谱资源紧张和利用率低问题.高效的信息多播及广播技术是CRAN的基础技术.

CRAN具有多信道特性、不同节点可用信道集

合的差异性及各信道报文传输质量的变化性<sup>[2]</sup>.网络编码(network coding, NC)<sup>[3]</sup>的出现则为此问题的研究提供了新思路 and 途径. NC融合编码和路由的概念,可更好地利用无线网络的通信广播性、数据冗余性、空间分布性等,显著提高无线网络的吞吐量、可靠性、负载均衡性等.随机网络编码(RNC)<sup>[4]</sup>中编码系数在伽罗瓦域<sup>[5]</sup> $GF(2^q)$ 中随机选定,从而使NC技术能应用于分布式应用中.

面向普通无线网络的NC技术,研究了NC应用于无线自组网组播技术<sup>[6-7]</sup>,考虑时变的、链路容量受噪声干扰影响的无线网络模型<sup>[7]</sup>.在时变无线网

收稿日期: 2017-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(61771089, 61671169, 61502072, 61471084); 中央高校基础科研业务费(852011)

作者简介: 陈炳才(1978—),男,博士,副教授

通信作者: 高振国, china@dlut.edu.cn

络模型的基础上,使用动态的压力反馈算法来分别优化 NC 和路由<sup>[8]</sup>. 用 NC 思想研究无线报文重传问题<sup>[9-12,15]</sup>等.

而关于在 CRAN 中应用 NC 技术的文献不多,如张波等<sup>[14]</sup>通过分析 NC 技术的特点,得出应用 NC 技术可降低 CRAN 中授权用户和非授权用户的无线信道访问冲突概率;高振国等<sup>[16]</sup>利用 NC 技术解决 CRAN 中的出错报文重传问题,可看作是链路层自动请求重传协议的改进和补充.

本文研究的 CRAN 报文多播或广播传输技术基于如下假设:首先,CRAN 中所有节点都支持一个公共的无线控制信道(传输通信控制报文)及多个数据信道;其次,数据源节点通过公共控制信道上的信息交互,已经利用传统多播路由发现算法建立以源节点为根,以多播接收节点为叶的多播树,所有数据报文将沿多播树多播到各接收节点;第三,控制报文通过公共无线控制信道传输,而数据报文通过各数据信道传输. 据此提出一种基于 RNC 的算法,该算法成批进行报文多播传输任务,且每批次中报文数量可变. 该算法的核心是对多信道单跳无线报文多播问题 MCSHWMP 的求解.

## 1 多信道单跳无线广播问题

MCSHWMP 的基本场景如下:在 CRAN 中,1 个发送节点有一批报文要广播给多个接收节点,且这些接收节点都在发送节点的无线传输覆盖范围内. 则 MCSHWMP 问题的目标是,考虑不同节点可用信道集合的差异性及各信道报文传输质量的变化性,在使各节点都能接收到各报文的前提下,寻求最优报文传输策略以尽量节省报文传输数量.

**定义 1** 多信道单跳无线多播问题 MCSHWMP. 具有多个工作信道是 CRAN 等多信道通信网络相对于传统无线网络的一个显著特征,故把 CRAN 中的 1 跳无线广播称为多信道单跳无线多播问题.

一个 MCSHWMP 问题可用四元组描述为

$$\text{MCSHWMP} = \{\mathbf{P}, \mathbf{R}, \mathbf{C}, \mathbf{B}\},$$

式中:  $\mathbf{P} = \{p_i \mid \forall i \in \{1, \dots, |\mathbf{P}|\}\}$  为该问题中发送节点要传输给各接收节点的报文集合;  $\mathbf{R} = \{r_i \mid \forall i \in \{1, 2, \dots, |\mathbf{R}|\}\}$  为接收节点集合;  $\mathbf{C} = \{c_i \mid \forall i \in \{1, \dots, |\mathbf{C}|\}\}$  为可用信道集合;  $\mathbf{B} = \{b_{i,j} \mid 1 \leq i \leq |\mathbf{R}|, 1 \leq j \leq |\mathbf{C}|\}$  为无线信道的报文传输成功概率矩阵,其基本元素  $b_{i,j}$  为发送节点与接收节点  $r_i$  之间的信道  $c_j$  的报文传输成功概率,对于某些不可用信道,  $b_{i,j} = 0$ .

**定义 2** MCSHWMP 问题的有效方案. 如果 MCSHWMP 问题的一个报文传输方案能保证各接

收节点能正确解码得到  $\mathbf{P}$  中各报文,则称这样的方案为 MCSHWMP 问题的有效方案.

**定义 3** MCSHWMP 问题的最优 NC 方案. MCSHWMP 问题的主要目标是尽量减小传输的无线报文数量,故本文把报文传输数量最少的 NC 方案称为 MCSHWMP 问题的最优 NC 方案.

本文中不限制 NC 所使用的伽罗瓦域  $\text{GF}(2^q)$ , 即不限定  $q$  的值. 为简化,记  $n_R = |\mathbf{R}|$ ,  $n_C = |\mathbf{C}|$ ,  $n_P = |\mathbf{P}|$ .

## 2 MCSHWMP 问题的数据报文多播传输算法

基于 NC 的报文多播传输是成批进行报文多播传输任务的,且每批的报文数量是可变的. 在进行多播数据传输前,数据源节点在公共控制信道上通过传统的多播路由发现算法建立以源节点为根、以多播接收节点为叶的多播树,然后源节点即开始向多播树广播报文,树内节点收到报文后,按本文所提方法进行处理并向下游节点转发,直到树叶节点收到该批次的所有报文. 多播树内节点根据局部信息自主决定何时开始下一批次报文的传输任务.

### 2.1 组合报文结构

基于 NC 的报文多播传输中,除编码报文外,接收节点需要一些辅助信息才能进行解码. 辅助信息一般与编码报文及其它信息封装在一个组合报文中,真正传输的是组合报文. 算法中组合报文包括 7 个字段: ID\_Src, ID\_Batch, ID\_Sender, PktNum\_inBatch, List\_Rcv, Info, Pkt.

字段 ID\_Src 为多播源节点编号(记为  $I_S$ ); ID\_Batch 标识当前正在处理的报文批号(记为  $I_B$ ); ID\_Sender 指示报文的发送者(记为  $I_X$ ); PktNum\_inBatch 指示该批中报文数量(记为  $N_P$ ); List\_Rcv 指示发送节点的下游接收节点集合(记为  $L_R$ ); Pkt 中保存一个编码报文,生成该编码报文时所使用的编码向量实际是由一个公共随机函数利用一个随机数作为种子生成的随机数序列,该序列长度为  $N_P$ . 编码系数均看作是伽罗华域  $\text{GF}(2^q)$  上的元素, Info 用于保存相应的随机数种子.

### 2.2 数据报文传输算法

基于 RNC 的 CRAN 报文多播传输算法分为报文发送算法和报文接收算法. 每个节点均有发送算法和接收算法的无限循环工作线程,分别进行数据报文发送和接收任务. 各节点的报文发送算法和接收算法协作完成报文多播传输任务. 下面给出算法基本框架,调整部分步骤即可得到不同算法.

数据报文发送过程中包括 2 个阶段:初始集中

报文发送和后续离散报文发送. 仅有初始集中报文传输并不能保证所有节点都能收到足够信息来解码得到当前多播报文批次的所有报文, 后续离散报文发送是为完成报文传输任务所必需的, 每次只传输一个组合报文, 传输该组合报文所用的信道按某后续离散报文信道选择策略确定. 数据报文发送算法流程具体描述如下

1) 数据报文发送算法框架流程:

**步骤1** 若本节点有已经接收完成的、要向下游节点传输的新批次数据报文, 且本节点有下游节点, 则转到步骤2; 否则继续等待.

**步骤2** 发送节点根据某种初始报文分配向量确定策略生成初始报文分配向量  $V_{\text{ini}} = \{x_1, x_2, \dots, x_{c_1}\}$ , 该向量元素  $x_j$  表示发送节点在初始集中报文发送阶段需要在信道  $c_j$  上传输  $x_j$  个组合报文.

**步骤3** 根据初始报文分配向量依次在信道  $c_j$  上传输  $x_j$  个组合报文.

for ( $j = 1, j \leq n_c, j++$ )

若  $x_j = 0$ , 则继续下一循环;

若  $x_j > 0$ , 则做如下工作:

通过公共控制信息交换信道通知各接收节点

$r \in \{r_i \mid b_{i,j} > 0\}$  把接收信道转移到信道  $c_j$ ;

构造  $x_j$  个编码报文  $p_{Y,i} = m_i \cdot P_X (i = \{1, 2, \dots, x_j\})$ , 其中编码系数向量  $m_i$  由随机数种子  $s_i$  生成;

构造组合报文  $P_{z,i} = \{I_S, I_B, I_X, N_P, L_R, s_i, P_{z,i}\}$ , 其中  $L_R = R_R$ ;

通过信道  $c_j$  广播所有  $x_j$  个组合报文  $p_{z,i}$ .

**步骤4** 启动定时器  $T_w$ , 该定时器在时间  $t_w = |R_R| \cdot T_R$  后结束 ( $T_R$  为参数, 其值大于接收一个回复报文所需的时间). 在这段时间内等待接收各接收节点的回复报文.

**步骤5** 若接收到某节点  $r_i$  的对当前批次数据报文的回复报文, 则表明该节点已经正确获得了自己所需所有报文.

**步骤6** 定时器  $T_w$  结束. 若  $R_R = \emptyset$  (空集), 则转到步骤1.

**步骤7** 构造1个编码报文  $p_Y = m \cdot P_X (i = \{1, 2, \dots, x_j\})$ , 其中编码系数向量  $m$  由随机数种子  $s_i$  生成; 其中  $P_X = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ .

**步骤8** 构造1个组合报文  $p_Z = \{I_S, I_B, I_X, N_P, L_R, s_i, p_Y\}$ , 并从信道  $c_j = \arg \max_{c_j \in C} (\sum_{r_i \in R_R} b_{i,j})$  上广播出去. 组合报文传输完成后转到步骤4.

2) 数据报文接收算法框架流程:

**步骤1** 若收到属于新批次的数据报文, 则转到步骤2; 否则继续等候新批次报文.

**步骤2** 初始化新报文批次的解码矩阵  $M_D$  为空矩阵, 初始化新报文批次的编码报文列向量  $P_Y$  为空向量.

**步骤3** 设收到的数据报文为  $p$ . 用  $p$  中 Info 作为随机数种子, 利用与生成编码矩阵时的相同方法恢复所用的编码向量并记作  $v$ ; 取出组合报文  $p$  中的报文 Pkt 并记作  $p_R$ , 即  $p_R = \text{Pkt}$ .

**步骤4** 据式(1)把行向量  $v$  附加到解码矩阵  $M_D$  作为其尾行.

$$M_D = \begin{bmatrix} M_D \\ v \end{bmatrix}. \quad (1)$$

**步骤5** 令  $p_R = \text{Pkt}$  根据式(2)把它添加到  $P_Y$  的尾部.

$$P_Y = \begin{bmatrix} P_Y \\ p_R \end{bmatrix}. \quad (2)$$

**步骤6** 在域  $GF(2^q)$  上计算解码矩阵  $M_D$  的秩  $\text{rank}(M_D)$ .

**步骤7** 若  $\text{rank}(M_D) < n$ , 则等待接收到新的组合报文, 转到步骤3.

**步骤8** 若  $\text{rank}(M_D) = n$ , 则对式(3)利用高斯约旦消元法进行解码获得自己所需所有报文.

$$M_D \cdot P_X = P_Y. \quad (3)$$

**步骤9** 若当前节点 ID 在报文的 List\_Recv 字段中, 则向发送节点发送 ACK 回复报文以告知发送节点自己已经获得当前批次所有报文.

**步骤10** 转到步骤1.

## 2.3 初始集中报文发送向量确定策略

初始集中报文发送阶段需要根据初始报文分配向量发送组合报文. 该分配向量对算法的时间延迟具有决定性影响, 对报文传输数量也有较大影响. 若报文分配向量中所确定的报文发送数量过多, 虽然可降低1跳报文多播任务的完成时间, 但有可能初始阶段发送的报文信息已经满足甚至超过了各节点的需要, 导致较多的报文传输, 增加了能量消耗; 若初始阶段发送的报文信息过少, 则可能需要在后续离散报文发送阶段传输较多的报文, 增加了1跳报文多播任务的完成时间, 而同时报文传输数总量也没有明显减少.

提出三种策略, 分别标记为: RAND1, LINK100, LINKRATIO. 显然, 它们的初始阶段发送报文数量依次增多.

1) RAND1 策略. 该策略中初始报文分配向量随机确定, 但须满足  $\sum_{j=1}^{n_c} x_j = 1$ , 即在随机选定的一个信道上发送一个组合报文.

2) LINKRATIO 策略. 求解 MCSHWMP 问题在

期望状态下的最优 NC 方案,即在期望状态下使各节点都能获得足够信息解码得到各原始报文的前提下,传输报文数量最少的方案,并把该方案的解作为初始报文分配向量.分析得知,该策略中初始报文分配向量为式(4)所示的整数线性规划问题的解向量.

$$\begin{aligned} \min & \sum x_j, \\ \text{s.t.} & \sum_{j=1}^{n_c} (x_j \cdot b_{i,j}) \geq n_p, \quad \forall i \in \{i, 1, 2, \dots, n_R\}; \\ & x_j \in \{0, 1, 2, \dots\}, \forall i \in \{i, 1, 2, \dots, n_c\}. \end{aligned} \quad (4)$$

式中整数规划变量为  $x_j$ , 其表示发送节点需要在信道  $c_j$  发送  $x_j$  个编码报文. 式中各个限制条件的意义为: 第 1 个约束条件保证接收节点  $r_i$  从各个信道上正确接收到的编码报文数量期望值之和要  $\geq$  其需要报文数量  $n_p = |\mathbf{P}|$ ; 第 2 个约束限定  $x_j$  只能取非负整数.

3) LINK100 策略. 求解 MCSHWMP 问题在各可用链路(即满足  $b_{i,j} > 0$  的链路)的报文传输成功率为 100% 情况下, 在各节点都能获得足够信息解码得到各原始报文的前提下, 寻找传输报文数量最少的最优网络编码方案, 并把该方案的解作为初始报文分配向量. 分析得知, 该策略中初始报文分配向量为式(4)所示的整数线性规划问题的解向量, 故只需将式(4)中的  $b_{i,j}$  用取整函数  $\text{ceil}(x)$  对  $b_{i,j}$  向上取整即可.

该策略获得的初始报文分配向量相当于理想状态下传输报文数量最少的方案.

## 3 仿真测试

### 3.1 待测试的算法

在 Matlab 中通过仿真测试 MCSHWMP 数据报文多播传输算法的性能. 比较 3 种初始集中报文发送向量确定策略 RAND1、LINK100 和 LINKRATIO (分别简记为 R1、L100、LR) 的性能特点.

另外, 为了评价基于 NC 的算法相对于传统非 NC 算法的性能, 对于一个 MCSHWMP 问题, 期望状态下传统非 NC 算法最少报文传输方案可转化为整数线性规划问题, 该规划问题的解可直接转化为 MCSHWMP 问题的非 NC 方案. 将该算法记作 NN, 并把它作为评价各算法性能基准.

综上, 仿真测试的算法包括 4 个: R1、L100、LR 和 NN. 这些算法中需要求解一些整数线性规划问题, 对之求解都采用了文献[12]所提出的渐进整定求解算法.

### 3.2 性能指标

1) 报文传输总数量. 该指标为 MCSHWMP 问题中发送节点为传输完一批报文所需发送的组合报文总数量, 包括初始集中报文传输阶段及后续离散报

文传输阶段所发送的报文. 它反映算法在节省报文数量方面性能.

2) 离散报文传输数量. 该指标为 MCSHWMP 问题中发送节点在后续离散报文传输阶段所发送的报文. 该指标可以部分表征算法的时间延迟.

3) 相对报文传输总数量. 相对报文传输总数量代表不同算法中报文传输总数量之间的比值. 例如, L100/NN 表示 L100 法的报文传输总数量与 NN 法的报文传输数量的比值.

4) 相对离散报文传输数量. 相对离散报文传输数量代表不同算法中离散报文传输数量之间的比值. 例如, L100/NN 表示 L100 法的离散报文传输数量与 NN 法的报文传输数量的比值.

5) 信道切换次数. 信道切换会增加能耗、延迟等额外的开销. 在某解决方案中, 若节点需要在  $n$  个不同信道工作, 则记信道切换  $n$  次. 一个 MCSHWMP 问题的发送节点及其所有接收节点的平均信道切换次数作为方案的信道切换次数指标.

### 3.3 仿真配置

仿真 MCSHWMP  $\{\mathbf{P}, \mathbf{R}, \mathbf{C}, \mathbf{B}\}$  问题时的仿真参数包括: 报文数量  $|\mathbf{P}|$ 、接收节点数量  $|\mathbf{R}|$ 、信道数量  $|\mathbf{C}|$ 、信道分散度  $c_L$ 、信道报文传输成功率基值  $L_{sb}$ . 一个组合  $\{|\mathbf{P}|, |\mathbf{R}|, |\mathbf{C}|, c_L, L_{sb}\}$  称为一个仿真配置.

针对一种仿真配置, 重复生成 100 个问题实例. 针对每个问题实例, 依次使用各测试算法进行处理, 记录相应指标. 把 100 个实例的仿真结果平均值作为最终结果, 并计算平均值的 95% 置信度区间.

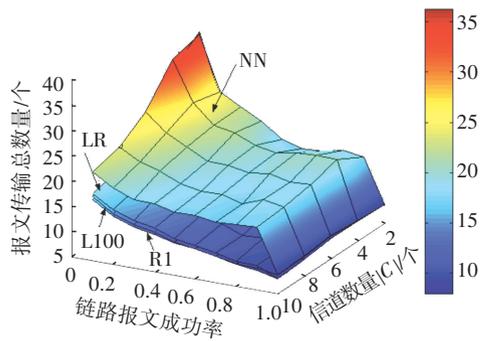
每个问题实例由一个大小为  $|\mathbf{R}| \times |\mathbf{C}|$  的信道报文传输成功率矩阵  $\mathbf{M}_B$  表示.  $\mathbf{M}_B$  的元素  $a_{i,j}$  如下确定: 取 (0,1) 区间内平均分布的随机数  $x = \text{rand}()$ , 若  $x < c_L$ , 则  $a_{i,j} = L_{sb} + (1 - L_{sb}) \text{rand}()$ , 表示发送节点和接收节点  $r_i$  间的信道  $c_j$  的报文传输成功率为  $a_{i,j}$ , 否则若  $x \geq c_L$ , 则  $a_{i,j} = 0$ .  $c_L$  只是用于在仿真中控制各节点可用信道的分布情况, 其值越大节点可用信道越多.

### 3.4 仿真结果

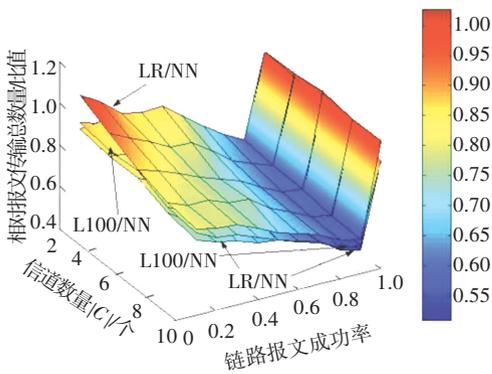
通过大量仿真测试报文多播传输算法的性能. 固定  $|\mathbf{P}| = 5$ 、 $|\mathbf{R}| = 5$ 、 $c_L = 0.5$ 、编码位数  $q = 8$ , 当  $|\mathbf{C}| \in [2, 10]$  且信道报文传输成功率基值  $L_{sb} \in [0.1, 1]$  时各算法性能指标的变化情况见图 1.

图 1(a)、(b) 结果表明, 信道数量对各算法相对 NN 法的性能影响不大, 而  $L_{sb}$  对各算法性能均有较大影响. 随着  $L_{sb}$  从 1 减小到 0.1, 相对报文传输数量先减小后增大, 并在  $L_{sb}$  约为 0.9 时相对报文传输总数量指标最低, 即此时基于 NC 的算法的优势最

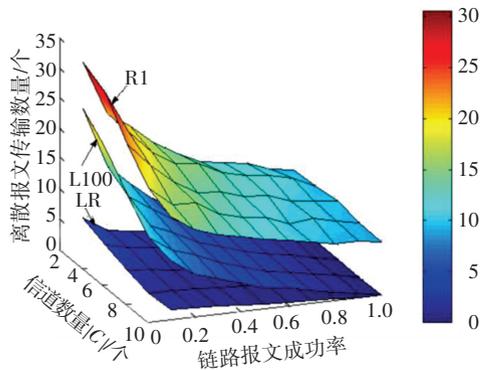
大. 当  $L_{sb} = 0.9$  时, L100、R1 相对于 NN 节省的报文传输数量近 50%. 这种现象可解释如下: 由于各规划变量只能取整数, 且为了满足约束条件, 各变量只能向上取整, 当  $L_{sb}$  比较接近 1 时, 相应的取消整数限制后的线性规划解可能稍大于整数, 向上取整后导致该变量的增加幅度更大, 而 NC 技术能综合各报文, 降低这种向上取整的不利影响, 从而使基于 NC 的算法相对于非 NC 算法的优势变大, 导致  $L_{sb}$  约为 0.9 时优势达到最大. LR 的相对报文传输总数量比 L100 和 R1 虽稍大, 但当  $L_{sb}$  约为 0.9 时其节省报文量仍约 45%, 所以 3 种基于 NC 技术的算法均能大幅度降低报文传输数量, 见图 2 (其中, R1/NN 为 R1Max 与 NN 之比, L100/NN 为 L100Max 与 NN 之比, LR/NN 为 LRMax 与 NN 之比).



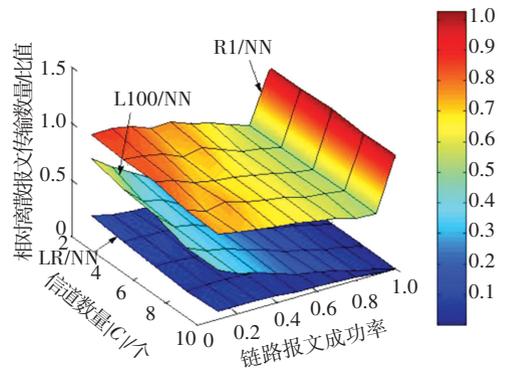
(a) 报文传输总数量



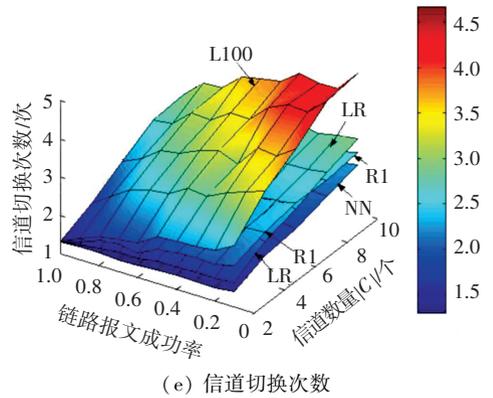
(b) 相对报文传输总数量



(c) 离散报文传输数量



(d) 相对离散报文传输数量



(e) 信道切换次数

图 1 信道数量和  $L_{sb}$  对各方案性能影响

Fig.1 Impact of the number of channels and  $L_{sb}$  on performance of each scheme

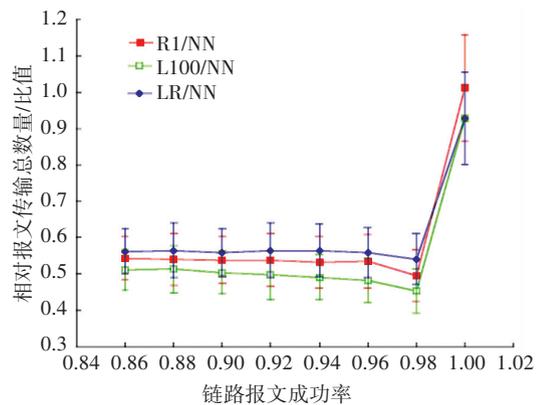


图 2  $L_{sb}$  对各方案性能影响

Fig.2 Impact of  $L_{sb}$  on performance of each scheme

对  $L_{sb} = 0.9$  附近的进一步仿真结果表明, 在  $L_{sb} = [0.9, 1]$  区段, 相对报文传输数量随  $L_{sb}$  的增大而减小, 直到在  $L_{sb} = 1$  时跃增到接近 1, 见图 2. 图 1(c)、图 1(d) 均显示出 LR 算法的离散报文传输数量很少, 表明集中报文传输数量较多. 离散报文传输数量越多, 算法完成所需的时间越长, 即延迟越长.

图 1(e) 中显示 LR 算法和 NN 的信道切换次数最少. 分析算法的工作过程易知, 在发送算法的每一个阶段内, 工作信道切换后不会再切换到原工作

信道,所以信道切换次数不超过  $|C|$ . 而两个阶段的信道切换次数具有叠加效果,所发送报文在两个阶段的分配情况将对信道切换次数指标具有重要影响. L100 算法中在两个阶段发送的报文均较多,所以其信道切换次数指标最大,而 R1 和 LR 的报文分别主要在第二阶段和第一阶段传输的,所以二者的信道切换次数较小. NN 算法是求解整数线性规划得到的优化理想解,所以其该指标最低.

## 4 结 论

本文研究了 CRAN 中的报文多播传输技术,基于网络编码构建了多播传输算法框架,并基于该框架提出了几种多播传输算法. 该算法通过引入随机网络编码技术,充分利用无线信道的广播性质降低报文传输数量;充分考虑传输节点对不同信道的访问权限及报文传输质量,使上游节点的每次报文传输都最大化后续节点的报文收益,提高报文多播和广播的传输效果;该算法有效节省了封装了编码报文的组合报文中用于解码的附加信息,降低了传输的组合报文长度.

## 参 考 文 献

[1] WASIM A, ARINDOM G, et al. Auto route selection based dynamic spectrum management under centralized cooperative communication in cognitive Radio[C]// International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering. Coimbatore, India: IEEE Press, 2014: 1-5. DOI: 10.1109/ICGCCCE.2014.6921385.

[2] MITOLA J. Cognitive radio: making software radios more personal [J]. IEEE Pervasive Communication, 1999, 6(4): 13-18. DOI: 10.1109/98.788210.

[3] 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.

[4] LIU Xingcheng, GONG Xinren, ZHENG Yongzhao. Reliable cooperative communications based on random network coding in multi-hop relay WSNs [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(8): 2514-2523. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2310899.

[5] 南基洙. 域和 Galois 理论[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 56-78. NAN Jizhu. Domain and galois theory [M]. Beijing: Science Press, 2009: 56-78.

[6] QUYuben, DONG Chao, GUO Song, et al. Spectrum-aware network coded multicast in mobile cognitive radio ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(6): 5340-5350. DOI: 10.1109/TVT.2016.2621007.

[7] SHAO Xing, WANG Cuixiang, XIANG Huihui. Network coding based energy efficient multicast routing for wireless sensor network [C]// IEEE 4th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication. Beijing, China: IEEE Press, 2013: 293-296. DOI: 10.1109/ICEIEC.2013.6835509.

[8] MOHANDESPOUR M, GOVINDARASU M, WANG Zhengdao. Rate, energy, and delay tradeoffs in wireless multicast: network coding versus routing [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016, 15(4): 952-963. DOI: 10.1109/TMC.2015.2439258.

[9] EL ROUAYHEB S Y, CHAUDHRY M A R, SPINTSON A. On the minimum number of transmissions insingle-hop wireless coding networks [C]// Proceeding of IEEE Information Theory Workshop. Lake Tahoe, California: IEEE Press, 2007: 120-125. DOI: 10.1109/ITW.2007.4313060.

[10] NGUYEN D, NGUYEN T, BOSE B. Wireless broadcast using network coding [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(2): 914-925. DOI: 10.1109/TVT.2008.927729.

[11] 姚玉坤, 余志龙, 陈曦, 等. 无线多跳网络中基于网络编码的高效可靠组播路由算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2015, 27(2): 151-157. DOI: 10.3979/j.issn.1673-825X.2015.02.002.

YAO Yukun, YU Zhilong, CHEN Xi, et al. High-efficiency reliable multicast routing algorithm based on network coding in wireless multi-hop network [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2015, 27(2): 151-157. DOI: 10.3979/j.issn.1673-825X.2015.02.002.

[12] 高振国, 赵蕴龙, 蔡绍滨, 等. 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. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2010.02.021.

GAO Zhenguo, ZHAO Yunlong, CAI Shaobin, et al. Random network coding based on optimal scheme for wireless packet retransmission problems [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(2): 231-234. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2010.02.021.

[13] MOHAMMAD C. Network coding in distributed, dynamic, and wireless environments: algorithms and applications [D]. San Antonio: Texas A&M University, 2011.

[14] 张波, 黄本雄, 戴彬, 等. 网络编码在认知无线电中的应用[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(1): 13-16. DOI: 10.19304/j.cnki.issn1000-7180.2010.01.004.

ZHANG Bo, HUANG Benxiong, DAI Bin, et al. Applications of network coding in cognitive radio systems [J]. Microelectronics & Computer, 2010, 27(1): 13-16. DOI: 10.19304/j.cnki.issn 1000-7180.2010.01.004.

[15] 樊婷婷, 杨维, 许昌龙. 双向中继信道中 Polar 码与物理层网络编码的联合设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(5): 134-139. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.05.022.

FAN Tingting, YANG Wei, XU Changlong. A joint design of physical layer network coding and polar code in two-way relay channel. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(5): 134-139. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.05.022.

[16] 高振国, 刘胜, 赵蕴龙, 马千里. 基于网络编码的认知无线电网络报文重传技术研究[EB/OL]. 中国科技论文在线 (<http://www.paper.edu.cn>). 200905-535. 2009.05.21.

GAO Zhenguo, LIU Sheng, ZHAO Yunlong, MA Qianli. Research on network coding based packet retransmission technology in cognitive radio wireless networks [EB/OL]. 2009.05.21. Sciencepaper Online (<http://www.paper.edu.cn>). 200905-535.

(编辑 苗秀芝)