

# 基于机会式网络编码的低时延广播传输算法

卢 冀,肖 嵩,吴成柯

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室,陕西西安 710071)

**摘 要:** 为了提高无线网络中数据包广播传输的效率,本文提出了一种基于机会式网络编码的广播传输算法.该算法在发送端按一定顺序选择不同终端的丢包,并采用异或运算编码重传包,在终端采用从重传包中解码数据包的方法恢复丢包.该算法优先恢复时间重要性较高的丢包,并使多个终端同时从单个重传包恢复其丢包,因此有效地提高了广播传输效率并降低了传输时延.在典型的无线信道条件下得到的仿真结果表明了本文算法相比其它算法可以有效地提高传输带宽并降低数据包传输时延.

**关键词:** 网络编码; 机会式网络编码; 无线网络; 传输带宽; 广播

**中图分类号:** TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 05-1214-06

## Opportunistic Network Coding Based Delay-Sensitive Broadcast Transmission Algorithm

LU Ji, XIAO Song, WU Cheng-ke

(National ISN Key Laboratory, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** An opportunistic network coding based broadcast transmission algorithm (ONCBT) is proposed to improve the transmission efficiency for wireless networks. ONCBT selects lost packets in a sorted order to generate the retransmission packet by XOR operations at sender, and retrieves lost packets from one or more retransmission packets at receivers. ONCBT has a priority to retrieve the lost packets owning higher time important level in each receiver with one retransmission packet, thus improving the transmission efficiency and packet transfer delay. The simulation results show that ONCBT can lead to higher transmission efficiency and lower packet transfer delay compared with other algorithms under typical wireless channel conditions.

**Key words:** network coding; opportunistic network coding; wireless network; transmission bandwidth; broadcast

## 1 引言

广播是无线网络中广泛使用的数据传输方式之一.然而,由于无线信道存在的多径衰落和干扰造成的随机和突发传输错误会导致广播传输效率大幅降低,因此需要设计高效的广播传输方法以提高无线网络的性能.

网络编码(Network Coding, NC)<sup>[1]</sup>在网络中间节点采用对输入信息进行线性或非线性编码的方式提高了信息流传输效率,在 NC 的基础上, Ho 等提出了随机线性网络编码<sup>[2]</sup>使 NC 技术应用于实际网络<sup>[3,4]</sup>,随后 Katti 等又提出了一种适用于无线网络的 NC 方法-机会式网络编码(Opportunistic Network Coding, ONC)<sup>[5]</sup>. ONC 可以减少信息传输次数<sup>[5,6]</sup>,并且基于 ONC 的传输算法能明显提高数据包的广播传输效率<sup>[7]</sup>,因此得到了深入的研究<sup>[8-10]</sup>,其中 Chou 等<sup>[8]</sup>提出了一种适用于 WiMAX 网络的传输算法,该算法虽复杂度较低,但重传时仍然采用

非编码方式传输数据包,导致传输效率下降;肖等<sup>[9]</sup>提出的算法当编码组合包中包含某个终端的多个丢包时,需要增加传输次数来恢复这些丢包,此时该算法性能不佳;Fan 等<sup>[10]</sup>提出的算法从全部丢包中搜索满足一定条件的数据包编码生成重传包,复杂度较高,而且没有考虑在重传过程中组合丢失包,使重传效率下降.此外,这些算法<sup>[8-10]</sup>没有考虑通过从多个重传包中获取数据包的方法来进一步提供传输性能<sup>[11]</sup>.

另一方面,为了获得更多的编码机会,基于 ONC 的广播传输方法选择数据包时会导致具有较高时间重要性丢包的传输存在一定延迟,因此会造成数据包传输延迟的增加,进而导致终端数据流拥塞,严重影响网络应用层用户数据的接收.因此,数据包传输延迟是设计基于 ONC 广播传输方法时需要考虑的关键因素之一<sup>[12]</sup>.

本文提出了一种基于 ONC 的无线广播传输(ONC based Broadcast Transmission, ONCBT)算法.在数据包重传

过程中,ONCBT 优先选择不同终端时间重要性高的丢包进行编码以提高数据包传输延迟性能,另一方面通过采用从多个重传包中恢复丢包的方法提高数据包的传输效率.因此 ONCBT 提高了数据传输效率,并降低了数据传输延迟.

## 2 基于 ONC 的广播传输方法

基于 ONC 的广播传输方法在发送端采用异或运算将不同的丢包编码组合成一个重传数据包,在终端亦通过异或运算从该重传包和已接受数据包中恢复其丢包.假设  $P_n(1 \leq n \leq N)$  和  $R$  表示数据包和编码组合包,分别用二进制序列  $\{p_{n1}, \dots, p_{nl}, \dots, p_{nL}\}$  和  $\{r_1, \dots, r_l, \dots, r_L\}$  表示,其中  $L$  表示它们的长度,则编码生成  $R$  中  $r_l$  可以描述为:

$$r_l = \sum_n \lambda_n p_{nl} \bmod 2, \lambda_n \in \{0, 1\} \quad (1)$$

其中  $\lambda_n = 1$  表示  $P_n$  编码于  $R$ , 否则  $P_n$  不参与编码.

如图 1 所示,源节点  $S$  传输  $P_1, P_2$  和  $P_3$  后,终端  $T_1, T_2$  和  $T_3$  分别丢失  $P_1, P_2$  和  $P_3, S$  采用异或方法生成重传包  $R = P_1 \oplus P_2 \oplus P_3$ , 则终端  $T_1$  可以通过异或方法  $R \oplus (P_2 \oplus P_3) = P_1$  恢复出  $P_1$ , 同理  $T_2$  和  $T_3$  可以恢复出  $P_2$  和  $P_3$ , 需 4 次传输;传统的传输方法需要分别重传  $P_1, P_2$  和  $P_3$ , 需 6 次传输.可见基于 ONC 的传输方法可以减少丢包重传的次数.

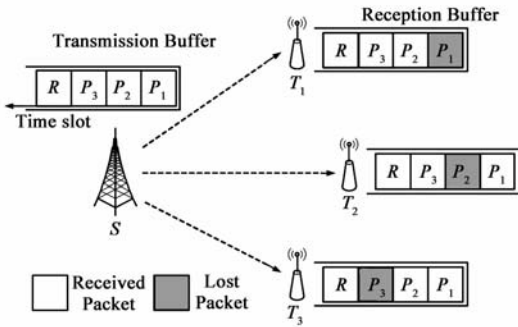


图1 基于机会式网络编码重传方法示例

## 3 ONCBT 传输方法

### 3.1 ONCBT 设计目标

假设无线网络的源节点为  $S$ , 终端为  $T_j(1 \leq j \leq M)$ , 发送数据包为  $P_i(1 \leq i \leq N)$ , 每个时隙  $S$  广播发送一个数据包, 终端  $T_j$  利用 ACK/NAKs 同步反馈其丢包信息. 当  $S$  发送完  $N$  个数据包后, 能得到  $M$  个终端的丢包信息, 这些信息可以用一个  $M$  行  $N$  列的矩阵  $\Omega$  来表示,  $\Omega$  中的第  $j$  行表示  $T_j$  的丢包信息, 第  $i$  列表示全部终端丢失  $P_i$  的信息,  $\Omega$  中元素  $\omega_{ji}$  表示  $T_j$  是否接收到  $P_i, \omega_{ji} = 1$  表示  $T_j$  丢失  $P_i$ , 反之表示  $T_j$  成功接收  $P_i$ . 图 2 给出了  $\Omega$  的示例.

传输带宽<sup>[9]</sup>可以用来描述传输算法的性能, 定义  $\eta$  表示传输带宽, 则  $\eta$  为:

$$\eta = \frac{N+K}{N} = 1 + \frac{K}{N} \quad (2)$$

其中  $K$  表示数据包重传的次数,  $N$  表示发送数据包的总数. 设传输单个数据包的时间间隔为  $t$ , 数据包传输延迟<sup>[10]</sup>表示从传输开始至终端成功收到某个数据包的时间间隔数.

### 3.2 ONCBT 编码策略

根据终端丢包信息  $\Omega$ , ONCBT 依次选择每个终端的丢包编码成单个重传包, 在选择某个终端的丢包时, 优先选择该终端时间重要等级高的丢包, 如此保证多个终端可以从一个重传包中优先恢复其丢包, 如此有助于减少重传的次数, 而且可以减少数据包传输延迟. 不失一般性, 假设终端的丢包按照时间重要等级高低进行排序, 即当  $i < j$  时,  $P_i$  的时间重要等级高于  $P_j$ .

ONCBT 算法步骤如下:

(1) 在第  $i(1 \leq i \leq N)$  个时隙,  $S$  广播发送数据包  $P_i$ , 若某个终端未能成功收到  $P_i$ , 该终端通过给  $S$  发送 NAK 信号说明其丢失  $P_i$ . 在  $N$  个时隙之后,  $S$  可以获得  $M$  个终端关于  $N$  个发送数据包的丢包信息  $\Omega$ , 如图 2 所示. 此阶段数据包传输的方式同传统广播传输方式相同.

	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$
$T_1$	1	0	1	0	0	0	0	0
$T_2$	0	1	0	0	0	0	0	0
$T_3$	0	0	1	0	1	0	0	0
$T_4$	0	0	0	1	0	0	1	0
$T_5$	0	0	0	0	1	1	0	0

图2  $\Omega$  示例

(2) 在第  $i(i = N + 1, N + 2, \dots)$  个时隙, 依次选择每个终端的一个丢包编码组合成重传包, 并重传该数据包, 若某个终端未能成功接收该重传包, 其通过发送 NAK 信号告之  $S$  其未恢复的数据包, 依次类推, 直到全部数据包都成功发送.

具体的做法是: 第一步, 从  $\Omega$  每行中选择第一个值为 1 的元素(时间重要等级较高), 再将这此元素所在列对应的数据包进行编码组合得到重传包  $R_1$ , 传输  $R_1$  后, 若  $T_j(1 \leq j \leq M)$  未收到  $R_1$ , 第  $j$  行所选择的元素值不变, 否则该元素值改为零; 第二步, 同理生成  $R_2$ ; 依次类推, 直到  $\Omega$  中所有元素值为零. 以图 2 所示  $\Omega$  为例,  $R_1 = P_1 \oplus P_2 \oplus P_3 \oplus P_4 \oplus P_5$ , 假设  $T_2$  未收到  $R_1$ , 则第二行所选元素值不变, 此时的  $\Omega$  如图 3 所示. 尔后,  $S$  传

	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$
$T_1$	0	0	1	0	0	0	0	0
$T_2$	0	1	0	0	0	0	0	0
$T_3$	0	0	0	0	1	0	0	0
$T_4$	0	0	0	0	0	0	1	0
$T_5$	0	0	0	0	0	1	0	0

图3  $T_2$  未成功收到  $R_1$  后的  $\Omega$

输  $R_2 = P_3 \oplus P_2 \oplus P_5 \oplus P_7 \oplus P_6$ , 所有终端收到  $R_2$ , 其中  $T_4$  和  $T_5$  通过  $R_1$  和  $R_2$  恢复各自的两个丢包,  $T_1$  先从  $R_2$  中恢复  $P_3$ , 再从  $R_1$  中恢复  $P_1$ , 可见 ONCBT 可以使终端从多个重传包中恢复各自的丢包, 此后  $\Omega$  为零矩阵, 第二阶段完成.

(3) ONCBT 使终端从多个重传包中恢复其丢包, 存在把某个终端的多个丢包组合到一个重传包中的可能性, 因此可能导致该终端不能从重传包中恢复丢包<sup>[11]</sup>, 此时采用发送不能恢复数据包的方式完成整个传输过程. ONCBT 通过判断终端的丢包存在于哪些重传包中找出该终端不能恢复的数据包, 当多个丢包同时存在于相同的重传包时, 终端不能恢复这些丢包.

令  $N$  维行向量  $E_i (1 \leq i \leq k \leq K)$  表示  $R_i$  中包含的数据包, 其中  $k$  表示第二阶段生成的重传包数, 那么  $E_i(n) = 1 (1 \leq n \leq N)$  表示  $P_n$  包含于  $R_i$ . 令  $\varphi_n$  表示数据包  $P_n$  包含在哪些重传包中的信息, 则  $N$  维行向量  $\Psi = [\varphi_1, \dots, \varphi_n, \dots, \varphi_N]$  表示全部发送数据包存在于哪些重传包中的信息. 对于终端  $T_j (1 \leq j \leq M)$ ,  $\varphi_n$  如式(3)所示

$$\begin{cases} \alpha_0 = w_j \\ \alpha_i = 2^i \cdot E_i(n) \cdot \alpha_{i-1} + \alpha_{i-1} \quad i = 1, 2, \dots, k \\ \varphi_n = \alpha_k \end{cases} \quad (3)$$

其中  $\alpha_i (0 \leq i \leq k)$  为计算  $\varphi_n$  所需的中间变量. 当  $T_j$  的丢包组合于不同重传包时, 通过式(3)得到的  $\Psi$  值不同, 因此 ONCBT 从  $\Psi$  中选择相等的非零元素即可得到  $T_j$  不能恢复的丢包. 例如图 2 中  $T_3$ , 其不能从重传包  $R_1$  和  $R_2$  中恢复其丢包  $P_3$  和  $P_5$ , 因此需要传输  $R_3 = P_3$  使  $T_3$  恢复  $P_3$  和  $P_5$ . 由式(3)得  $\Psi = [0, 0, 15, 0, 15, 0, 0, 0]$ ,  $\varphi_3 = \varphi_5 \neq 0$ ,  $T_3$  不能从  $R_1$  和  $R_2$  中恢复  $P_3$  和  $P_5$ .

ONCBT 通过三个阶段成功广播发送  $N$  个数据包, 当终端  $T_j (1 \leq j \leq M)$  收到  $N + K$  个数据包后, 一定能收到  $N$  个发送的数据包. 分两种情况讨论: ①当重传包  $R_x (1 \leq x \leq K)$  中组合  $T_j$  的一个丢包时,  $T_j$  可以通过异或运算( $\oplus$ )得到该丢包; ② $R_x$  中组合  $T_j$  的多个丢包时, 由编码策略知, ONCBT 依次将这些丢包组合到不同的重传包中, 使终端从多个重传包中恢复这些丢包(第二阶段), 并且当  $T_j$  不能恢复其丢包时, 再传输数据包保证  $T_j$  能恢复其丢包(第三阶段). ONCBT 算法传输数据包的伪代码如图 4 所示.

## 4 性能分析

### 4.1 平均传输带宽

当  $N$  足够大时, 文献[7]给出了最优的基于 ONC 的广播传输算法的平均传输带宽  $\eta_{opt}, \eta_{opt}$  表示为:

$$\eta_{opt} = \frac{1}{1 - q_{max}} \quad (4)$$

其中  $q_{max} = \max\{q_1, q_2, \dots, q_j, \dots, q_M\}$ ,  $q_j \in [0, 1)$  表示  $T_j$  的丢包率. 令  $R^*$  和  $\eta^*$  分别表示 ONCBT 的平均重传传输次数和平均传输带宽. 则由式(2)得到  $\eta^*$  的表达式为

$$\eta^* = \frac{N + R^*}{N} = 1 + \frac{R^*}{N} \quad (5)$$

那么在一定丢包率的条件下, ONCBT 第三阶段中不可恢复数据包数占发送数据包的比例非常小(见图 5), 因此 ONCBT 平均每个重传包可使终端恢复其一个丢包, 其平均重传次数  $R^*$  等于丢包率最大终端的丢包数, 则

$$R^* = N \cdot q_{max} + N \cdot q_{max}^2 + \dots = N \cdot \sum_{i=1}^{\infty} q_{max}^i \quad (6)$$

其中  $N \cdot q_{max}^i (i \geq 2)$  表示传输  $N \cdot q_{max}^{i-1}$  个数据包的平均丢包数. 式(6)代入式(5), 可得

$$\eta^* = 1 + \sum_{i=1}^{\infty} q_{max}^i = 1 + \frac{q_{max}}{1 - q_{max}} = \frac{1}{1 - q_{max}} \quad (7)$$

因此  $\eta^* = \eta_{opt}$  说明 ONCBT 能使数据包的传输效率最佳.

```

ONCBT算法伪代码
Inputs:  $\Omega, N, M$ 
Outputs:  $R_x (x=1, 2, \dots, K)$ 
1: For  $i=1 : N$  //Stage1
2:   S 传输  $P_i$ 
3:   S 根据终端NAKs 得到  $\Omega$ 第列
4: End For
5: For  $i=1 : N$  //Stage2
6:   For  $j=1 : M$ 
7:     从  $\Omega$ 第行选择值为1元素对应的数据包
8:   End For
9:   把不同的数据包编码成  $R_x (x \in \{1, \dots, k\})$ 
10: End For
11: For  $j=1 : M$  //Stage3
12:   For  $n=1 : N$ 
13:     根据式(3)计算  $\varphi_n$ 
14:   End For
15:   由  $\Psi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N]$  得到  $T_j$  不可恢复的丢包
16:   选择丢包作为  $R_x (x \in \{k+1, \dots, K\})$ 
17: End For
    
```

图4 ONCBT算法伪代码

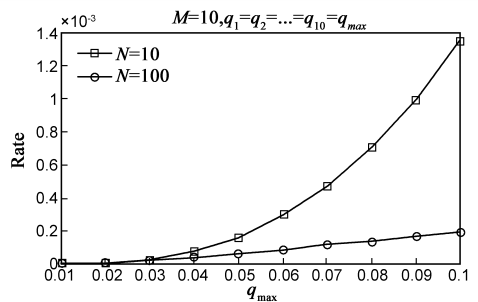


图5 ONCBT第三阶段不可恢复数据包比例

### 4.2 数据包传输延迟

令  $d_j(n)$  表示终端  $T_j (1 \leq j \leq M)$  成功收到第  $n (1 \leq n \leq N)$  个数据包的延迟. ONCBT 的终端  $T_j$  可在三个步骤(3.2 小节)中收到  $P_n$ , 则  $P_n$  的平均传输延迟  $E[d_j(n)]$  可以表示为

$$E[d_j(n)] = tn(1 - q_j) + t(N + E[R](n, q_j))q_j$$

$$+ t(N + E[R](N, q_j))o(q_j) \quad (8)$$

其中  $q_j$  表示  $T_j$  的丢包率,  $t$  表示一个时隙的时间,  $E[R](n, q_j)$  表示丢包率为  $q_j$  时成功传输  $n$  个数据包需要的平均重传次数, 由式(6)可知,  $E[R](n, q_j)$  表示为

$$E[R](n, q_j) = \frac{nq_j}{1 - q_j} \quad (9)$$

此外, 式(8)右边第三项表示步骤(3)传输数据包的平均延迟, 在一定条件下, 通过此步骤传输数据包的概率(见图 5)为  $o(q_j)$ , 该项可以忽略. 因此, ONCBT 成功传输  $P_n$  的平均延迟  $E[D(n)]$  为

$$\begin{aligned} E[D(n)] &= \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M E[d_j(n)] \\ &= \frac{t}{M} \sum_{j=1}^M \left( Nq_j - 2nq_j + \frac{n}{1 - q_j} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

另一方面, 基于 ONC 的传输算法在选择丢包进行组合时会产生一定的编码延迟, 进而影响系统的性能(例如吞吐量). ONCBT 直接选择每个终端的不同丢包编码成重传包, 编码延迟和复杂度较低.

## 5 仿真结果

在实验中, 采用如图 1 所示的多播网络, 源节点  $S$  每次通过广播方式给  $M$  个终端发送一个数据包, 数据包的长度和发送数据包的时间间隔都相同. 仿真实验得出了发送全部数据包所需的平均传输带宽和传输数据包的平均延迟.

为了能有效反映传输算法在实际网络环境下的性能, 仿真采用典型的丢包率模型来模拟实际无线信道的状态<sup>[7]</sup>, 丢包率模型分为以下三类: (1) 终端丢包率不相关; (2) 终端丢包率相关; (3) 终端丢包率服从二状态马尔可夫过程.

比较了下述算法的性能: (1) 传统的存储转发机制的传输算法, 记为 SF; (2) 一种适用于 WiMAX 的传输算法<sup>[8]</sup>, 记为 TNC; (3) 文献[9]中提出的传输算法, 记为 NCWBR; (4) 文献[10]中提出的传输算法, 记为 DNC; (5) 本文提出的算法, ONCBT. 其中算法(2)~(5)是基于 ONC 的传输算法.

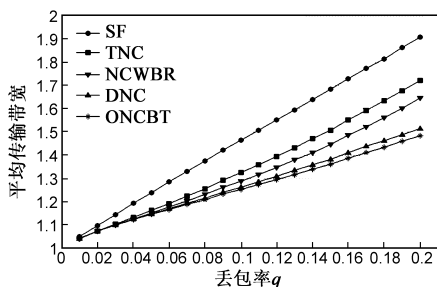


图6 终端丢包率相同时性能比较

### 5.1 丢包不相关模型

丢包率  $q$  变化范围是  $[0.01, 0.2]$ , 步长为 0.01, 终端数  $M = 5$ , 数据包数  $N = 10$ , 终端丢包率相等. 图 6 显示了丢包率变化对算法传输带宽性能的影响. 基于 ONC 的传输算法的性能明显优于传统的 SF 算法. 随着丢包率的增加, ONCBT 算法的性能好于其它算法. ONCBT 选择丢包的编码策略较好, 因此其平均传输带宽最小, 而 SF 算法不对数据包进行编码, 其平均传输带宽最大.

为了说明终端数同平均传输带宽的关系,  $N = 50$  时, 图 7 显示了不同终端数  $M$  对平均传输带宽的影响. 由图可知, 当  $M$  值不同时, ONCBT 的性能最好, 并且随着  $M$  的增加, 其性能较 SF, TNC, NCWBR 更好.

式(10)说明了某终端单个数据包的平均传输延迟由该终端的丢包率决定. 当  $M, N$  分别为常数 5 和 30 时, 图 8 进一步显示了一定丢包率条件下算法传输全部数据包的延迟. 由比较可知, 本文算法传输数据包的延迟低于其它算法, 并且随着丢包率的增加, 其性能更好于其它几种算法.

### 5.2 丢包相关模型

终端  $T_j (2 \leq j \leq M)$  的丢包率跟前  $j - 1$  个终端是否发生丢包相关. 令  $\rho_Y$  和  $\rho_N$  分别表示发生丢包和未发生丢包的相关系数, 则当  $j = 2, 3, \dots, M$  时,  $q_j = [\rho_Y \cdot N_Y + \rho_N \cdot (j - 1 - N_Y)] / (j - 1)$ , 且  $q_1 = q$ , 其中  $N_Y$  表示  $\{T_1, T_2, \dots, T_{j-1}\}$  中未收到数据包的终端数. 为了有效地表示终端丢包率的相关性, 实验中选择  $\rho_Y = 0.8$  和  $\rho_N = 0.1$ ,  $q_1$  变化范围是  $[0.01, 0.2]$ , 步长为 0.01,  $M = 5, N = 10$ .

如图 9 所示, ONCBT 算法性能最优. 随着丢包率的增加, SF, TNC, DNC 和 ONCBT 算法性能差异变化不大, 原因在于 TNC, DNC 和 ONCBT 重传包中包含的丢包数较少. 此时, 因 NCWBR 算法需要发送更多的重传包来保证终端恢复其丢包, 此时其平均传输带宽大幅增加.

图 10 给出了不同算法传输数据包的平均时延,  $M = 5, N = 30$ . 本文算法的性能明显好于其它几种算法, 原因在于当终端丢包相关时, 该算法依次选择每个终端丢包的数据包组合策略提高了丢包进行编码的可能性, 降低了终端恢复丢包的延迟.

### 5.3 二状态马尔可夫模型

为了比较信道发生连续丢包时算法的性能, 我们定义二状态马尔可夫过程的两个状态为小丢包状态  $S_g$  和大丢包状态  $S_b$ .  $P_\alpha$  和  $P_\beta$  分别表示  $S_g$  到  $S_b$  的转移概率和  $S_b$  到  $S_g$  的转移概率. 不同终端丢包率相互独立, 选择  $P_\alpha$  的范围是  $[0, 0.2]$ , 变化步长为 0.02,  $P_\beta$  为固定值 0.4,  $S_g$  和  $S_b$  对应的丢包率分别为 0.01 和 0.5,  $M =$

5,  $N = 10$ .

图 11 显示了算法的传输带宽,当  $P_\alpha = 0$  时,信道处于小丢包状态,终端丢包率为 0.01,此时全部传输算法的性能几乎相等,随着  $P_\alpha$  的增加,  $P_\beta$  保持不变,信道处于大丢包状态的时间增加,丢包数增多,ONCBT 算法重传包中组合更多的丢包更多,因此其性能明显好于其它传输算法的性能. DNC 算法采用从每次传输后的所

有未恢复数据包中进行编码选择的方法会导致其重传次数增加,其性能明显下降.

图 12 给出了终端连续丢包时不同算法传输数据包的平均时延.  $M$ 、 $N$  分别是 5 和 30. ONCBT 传输数据包的延迟最小. 因此本文算法可以提高无线网络数据包广播传输的性能,有效地降低传输带宽和传输延迟.

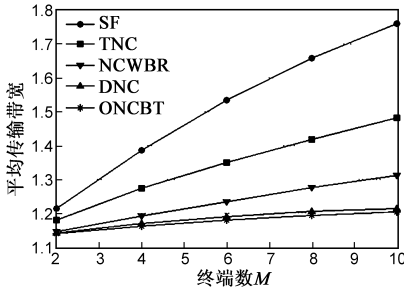


图7 终端数对性能的影响

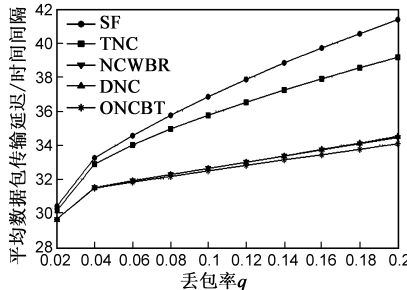


图8 丢包不相关时数据包传输延迟

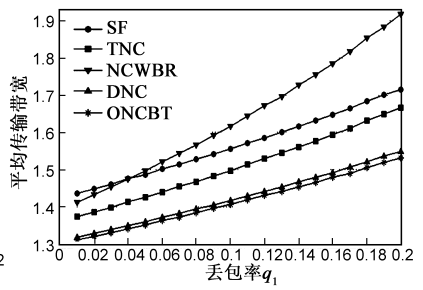


图9 终端丢包率之间相关时算法性能比较

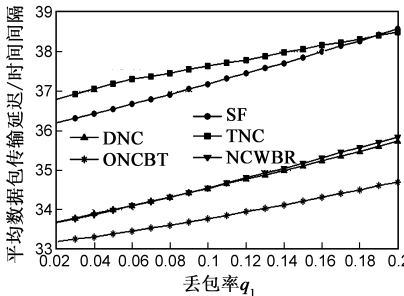


图10 丢包相关时数据包传输延迟

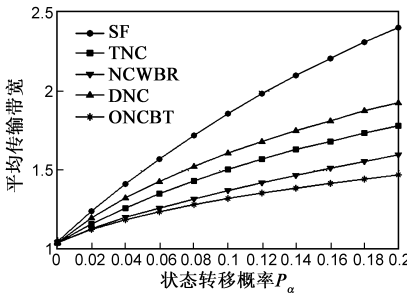


图11 连续丢包时算法性能比较

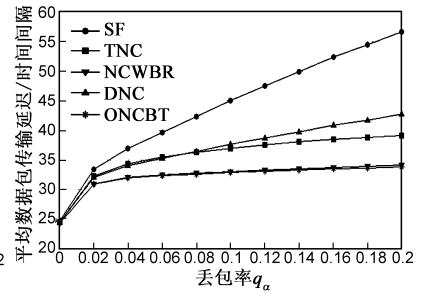


图12 连续丢包时数据包传输延迟

### 6 结论

该算法优先选择不同终端时间重要性高的丢包进行编码以提高数据包传输延迟性能,并采用从多个重传包中恢复丢包的方法提高数据包的传输效率. 仿真结果说明了本文方法在典型信道丢包模型下具有有效性和可行性. 该方法是一种适用于单跳无线网络的数据包传输方法.

#### 参考文献

[1] R Ahlswede, N Cai, S-Y R Li, et al. Network information flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204 - 1216.

[2] T Ho, M Médard, R. Koetter, et al. A random linear network coding approach to multicast[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(10): 4413 - 4430.

[3] 蒲保兴, 杨路明, 王伟平. 网络拓扑为知环境下确定性网络编码数据传输[J]. 电子学报, 2009, 37(10): 2119 - 2124. Pu Bao-xing, Yang Lu-ming, Wang Wei-ping. A deterministic data transmission approach with network coding under unknown network topology[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(10): 2119 - 2124. (in Chinese)

[4] 黄辰, 王芙蓉, 戴彬, 等. 基于网络编码的无线自组织网数据分发机制[J]. 电子学报, 2010, 38(8): 1852 - 1857. Huang Chen, Wang Fu-rong, Dai Bin, et al. Network coding based data dissemination in wireless ad hoc networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(8): 1852 - 1857. (in Chinese)

[5] S Katti, H S Rahul, H Wenjun, et al. XORs in the Air: practical wireless network coding[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(3): 497 - 510.

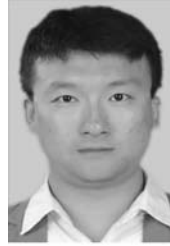
[6] 王晓东, 霍广城, 孙海燕等. 移动自主网中基于部分网络编码的机会主义路由[J]. 电子学报, 2010, 38(8): 1736 - 1740. (in Chinese) Wang Xiao-dong, Huo Guang-cheng, Sun Hai-yan, et al. An opportunistic routing for MANET based on partial network coding[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(8): 1736 - 1740. (in Chinese)

[7] D Nguyen, T Tran, T Nguyen, et al. Wireless broadcast using network coding[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(2): 914 - 925.

[8] C Chingchun, W Hungyu. Network coding based data distribution in WiMAX[A]. Proceedings of International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware[C]. USA: IEEE Press, 2009. 393 - 394.

- [9] 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[J].通信学报,2009,30(9):69-75.  
Xiao Xiao, Wang Wei-ping, Yang Lu-ming, et al. Wireless broadcasting retransmission approach based on network coding [J]. Journal on Communications, 2009, 30(9): 69-75. (in Chinese)
- [10] F Pingyi, C Zhi, C Wei, et al. Reliable relay assisted wireless multicast using network coding[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(5): 749-762.
- [11] S E Rouayheb, A Sprintson, C 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.
- [12] Y Tanigawa, J-O Kim, H Tode. Delay-sensitive retransmission method based on network coding in IEEE 802.11 wireless LANs[A]. Proceedings of IEEE GLOBECOM[C]. Miami, USA; IEEE, 2010. 1-6.
- [13] S Sorour, S Valae. Adaptive network coded retransmission scheme for wireless multicast[A]. Proceedings of IEEE Symposium on Information Theory[C]. USA; IEEE Press, 2009. 2577-2581.

### 作者简介



卢 冀 男,1981年出生于陕西省西安市.现为西安电子科技大学在读博士研究生,主要研究方向为网络编码、视频压缩编码及传输、网络多媒体系统.

E-mail: lujicolin@126.com



肖 嵩 女,1977年生于陕西省西安市.博士,现为西安电子科技大学副教授,主要研究方向为网络编码、视频/图像联合信源信道编码、多媒体通信.

吴成柯 男,1938年出生于安徽省黄山市.现为西安电子科技大学教授,博士生导师,主要研究方向为图像通信、压缩编码、计算机视觉及计算机图形学.